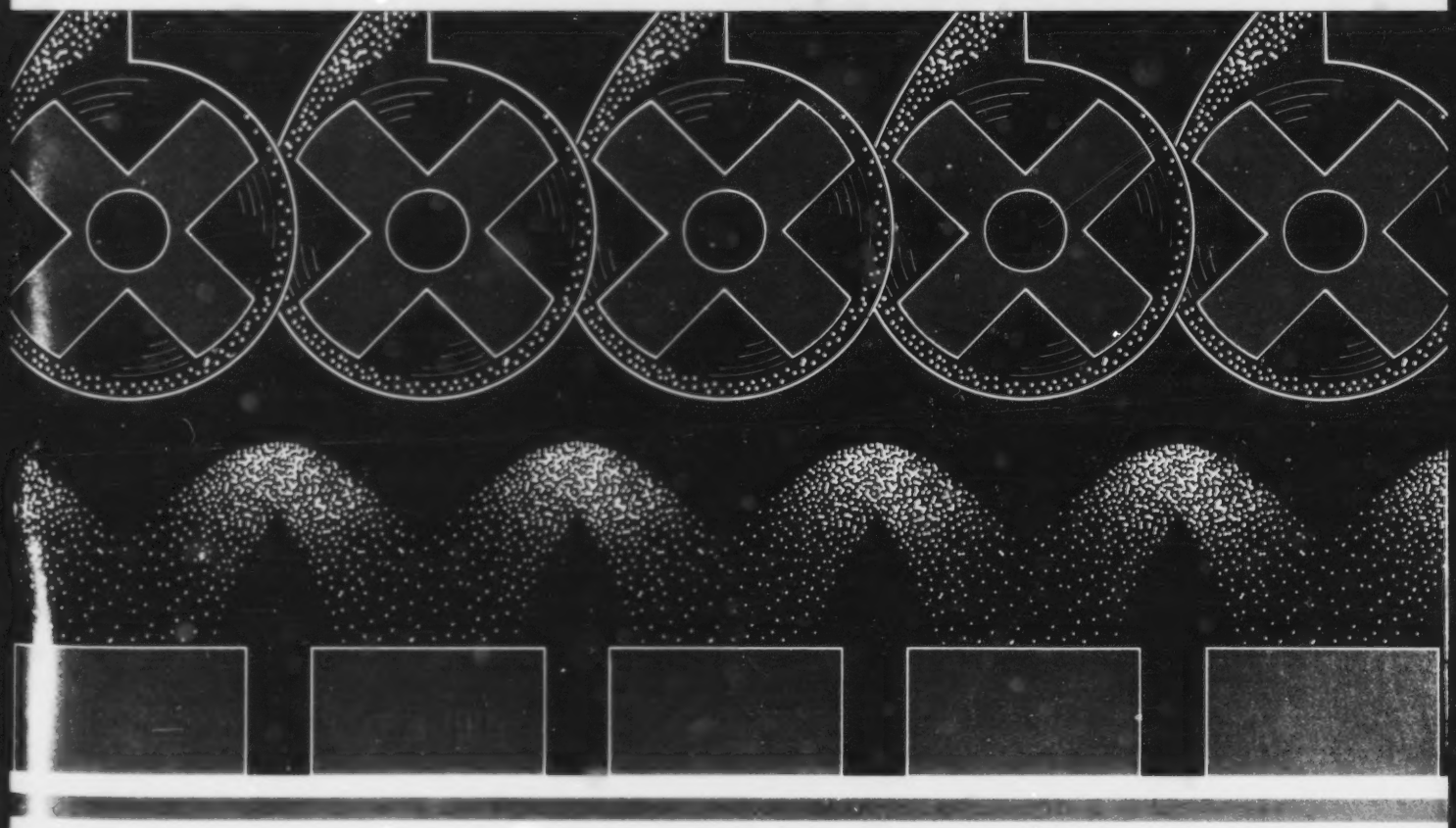
Agriculture Canada

Handling Agricultural Materials

Size reduction and mixing



Canada

Handling Agricultural Materials

Size reduction and mixing

Research Branch
Agriculture Canada

Publication 1843/E
1990

90-06438/

©Minister of Supply and Services Canada 1990
Cat. No. A15-1843/1990E
ISBN 0-660-13446-2
Printed 1990

Available in Canada through authorized bookstore agents
and other bookstores or by mail from

Canadian Government Publishing Centre
Supply and Services Canada
Ottawa, Canada K1A 0S9

Price is subject to change without notice

Previously published under the title
Canadian Agricultural Materials Handling Manual.
3.2 Size Reduction and Mixing.
Agric. Can. Publ. 5002.

Also available in French under the title
Manutention de produits agricoles :
Appareils de trituration et de mélange

Canadian Cataloguing in Publication Data

Handling agricultural materials. Size reduction
and mixing

(Publication ; 1843/E)

Previously published under title: Canadian agricultural materials handling manual. 3.2. Size reduction and mixing.
"Prepared by UMA Engineering Ltd."–Foreword.
Includes bibliographical references.
Cat. No. A15-1843/1990E
ISBN 0-660-13446-2

1. Size reduction of materials. 2. Milling-machines. 3. Mixing machinery. 4. Agricultural machinery. I. Rudnitski, Sharon. II. Birenbaum, Rhonda. III. Heslop, L. IV. UMA Engineering Ltd. V. Canada. Agriculture Canada. Research Branch. VI. Series: Publication (Canada. Agriculture Canada). English ; 1843.

TJ1225.H3 621.914 C90-099102-X

Staff editor
Sharon Rudnitski
Research Program Service

Contract editor
Rhonda Birenbaum

Scientific adviser for contract research
L. Heslop
Engineering and Statistical Research Centre

CONTENTS

Foreword 5

1 **FUNDAMENTAL PRINCIPLES** 7

1.1 **Size characteristics** 7
1.2 **Kernel structure** 8
1.3 **Mechanical and biological reduction** 10

2 **REDUCTION METHODS** 10

2.1 **Hammer mills** 10
2.2 Design and operation 10
2.3 Product types 13
2.4 Screen design 13
2.5 Hammer design 14
2.6 Speed of rotation 16
2.7 Air in the grinding process 17
2.8 Moisture content 17
2.9 Method of feeding 18
2.10 Conveying finished product 19
2.11 Dust control 19
2.12 Installation, maintenance, and safety 20
2.13 Selection 21
2.14 **Roller mills** 21
2.15 Design and operation 21
2.16 Operating characteristics 21
2.17 Roll types 21
2.18 Roll grooving 22
2.19 Roll spacing 23
2.20 Roll speed 23
2.21 Feeding 24
2.22 Dry rolling and crumbling 26
2.23 High-moisture rolling 26
2.24 Steam rolling 27
2.25 Conveying and storing rolled material 29
2.26 Installation and maintenance 29
2.27 **Comparing hammer and roller mills** 30

3 **MIXING** 30

3.1 **Purpose** 30
3.2 **Theory** 31
3.3 Bulk density 31
3.4 Size and shape of feed materials 32
3.5 Moisture content 32
3.6 Mixing time 32
3.7 Loading and unloading mixers 33
3.8 Agitator design 33
3.9 Types of mixers 33
3.10 **Horizontal batch mixers** 33
3.11 Ribbon agitators 34
3.12 Paddle agitators 34
3.13 Installation 34
3.14 Power requirements 34
3.15 **Vertical batch mixers** 35
3.16 Loading and unloading 35
3.17 Power requirements 36
3.18 **Comparing horizontal and vertical batch mixers** 36
3.19 **Tumble batch mixers** 36
3.20 **Continuous-flow mixers** 36
3.21 Agitator mixers 36
3.22 Proportional-blending mixers 36
3.23 **Mixer selection** 37
3.24 **Sample problem: mixed rations for cows and followers, hogs, and hens** 38
3.25 **Seed treating** 38

4 **COMBINATION MILLS** 40

4.1 **Stationary mills** 40
4.2 Proportional grinder–mixers 40
4.3 Packaged-pelleting plants 41
4.4 **Mobile mills** 42
4.5 Grinder–mixers 42
4.6 Roller–mixers 43
4.7 Mixer–feeders 43
4.8 **Hay grinders** 44
4.9 Small bale grinders 44
4.10 Tub grinders 44

References 45

Tables

1 Sieve designations and sizes 7
2 Quality of grind as related to particle size and modulus of fineness 9
3 Process recommendations for livestock feed 11
4 Hammer mill operating speeds 16
5 Relationship between power requirements and moisture content for two conventional hammer mills 18
6 Relationship between mill output and moisture content for wheat in a mill using a 3-mm screen 18
7 Capacity of a roller mill as a function of roll grooving, roll size, and power requirements 23
8 Boiler requirements for steam rolling 29

9 Effect of roll spacing and screen size on grinding rate and geometric mean diameter 30
10 Relationship between modulus of uniformity and mixing performance for a vertical batch mixer 32
11 Yield increase with seed treatment 40
12 Performance of a tub grinder with a 51-mm screen 44

Figures

1 Lognormal distribution for sorghum grain ground through a screen of 3.18 mm 8
2 Kernel structure of wheat 8
3 Kernel structure of dent corn 10
4 Hammer mill detail 12
5 Particle motion between screen and hammers 12
6 Inlet design and grinding locations 13
7 Effect of the kind of grain on mill specific capacity 13
8 Effect of screen opening size on specific capacity for mills grinding corn 14
9a Effect of small hammer size on mill specific capacity 15
9b Effect of large hammer size on mill specific capacity 15
10 Comparison of standard and hard-faced hammers 15
11 Effect of hammer-screen clearance and number of hammers on mill performance 16
12 Effect of rotor speed on the specific capacity of a mill grinding shelled corn 16
13 Effect on gravity discharge and fan discharge of temperature increase due to grinding 17
14 Specific capacity vs. air flow rate 17
15 Effect on gravity discharge and fan discharge of moisture content of the grain for a mill grinding corn 18
16 Specific capacity for fan and gravity discharge 19
17 Hammer mill discharge and material-conveying methods 20
18 Transition connection detail 20
19 Cross section of a roller mill 21
20 Side view of an industrial roller mill 22
21 Internal operation of a two-pair roller mill 23
22 Roll groove pattern for dicing 23
23 Effect of bottom roll spacing and roll speed differential on corn grinding rate 24
24 Effect of roll speed differential on corn particle size distribution 25
25 Effect of roll speed differential on corn particles retained 26
26 Effect of bottom roll spacing on corn particle size distribution 27
27 Feed mechanism for whole corn 28
28 Water-mixing chamber 28
29 Steam chest mounted on a one-pair roller mill 28
30 Coefficient of variation vs. bulk density for a vertical batch mixer 31
31 Coefficient of variation vs. mixing time for a feed ration of 100% grain 32
32 Coefficient of variation vs. mixing time for a feed ration of 60% grain and 40% hay 32
33 Coefficient of variation vs. mixing time for a horizontal batch mixer 33
34 Uniform and expanded flighting patterns for agitators in vertical batch mixers 33
35 Horizontal batch mixer with double-ribbon agitator 34
36 Horizontal batch mixer with paddle blades 34
37 Construction and operating details of a vertical batch mixer 35
38 Floor-loading vertical batch mixer 35
39 Flighting styles for agitator mixers 37
40 Continuous-flow mixer 37
41 Schematic view of a blending operation 37
42 Seed treater with mounted coating chamber 39
43 Coating chamber flighting types 39
44 Mist seed treater 39
45 Dust type seed treater 40
46 Proportional grinder–mixer 40
47 Proportional grinder–mixer with roller mill 41
48 Simple packaged-pellet plant 41
49 Sophisticated packaged-pellet plant 42
50 Mobile mixer–grinder 43
51 Cross section of a mobile mixer–feeder 43
52 Trailer mixer–feeder 43
53 Tub grinder 44

FOREWORD

Handling Agricultural Materials is produced in several parts as a guide to designers of materials-handling systems for farm and associated industries. Sections deal with selection and design of specific types of equipment for materials handling and processing. Items may be required to function independently or as components of a system. The design of a complete system may require information from several sections of the manual.

This section was prepared by UMA Engineering Ltd., Winnipeg, Man., for the Canada Committee on Agricultural Engineering Services of the Canadian Agricultural Services Coordinating Committee.

1 FUNDAMENTAL PRINCIPLES

The general term size reduction includes the mechanical processes of cutting, shearing, crushing, grinding, and milling feed grains. These processes expose more surface area for digestion without causing any noticeable change in the chemical properties of the material. At the same time, size reduction facilitates uniform mixing. And although uniformity in size and shape of the reduced particles is usually desired, it is seldom attained.

The various reduction processes can be defined this way:

- Cutting separates or reduces particles by forcing a knife edge through the material.
- Crushing applies a compressive force to the particles.
- Shearing combines cutting and crushing.
- Grinding employs an impact force to reduce the particles.
- Milling, a general term, reduces grain to meal or flour. It also describes the processes of dehulling, scarifying, polishing, sorting, and mixing, as well as certain chemical reactions. Milling sometimes also refers to the separation of fibers in flax, hemp, and ramie.

Hammer mills and roller mills are the two most common machines used for reducing particle size in Canadian agriculture. Hammer mills are used for manufacturing pellets or extruding ground grain. Hammer mills are also used to produce finely ground materials. In contrast, roller mills yield material relatively uniform in size and only slightly pulverized.

The materials to be reduced vary greatly in rheological properties. Yet, the method of reduction must produce the required end product as efficiently and economically as possible.

Mixing disperses ingredients to a specified formulation so that any sample of the whole contains each component in the same proportion. Accurately mixing materials of widely varying properties is a difficult task. Densities of dry ingredients in feed milling can vary sevenfold. Differences in particle size, shape, density, electrostatic charge, and cohesion can cause segregation. What's more, liquids also have different viscosities and densities and impart various characteristics to dry products when mixed with them.

1.1 Size characteristics

Evaluate the performance of a machine used to reduce the size of material on the basis of these characteristics:

- throughput capacity
- power requirements per unit of reduction
- quality of the material after reduction
- degree of uniformity of the resulting material

Performance evaluation requires a method of assessing the size characteristics of various materials. For spherical or cubical particles, refer to the American Society of Agricultural Engineers standard ASAE S319.1, "Method of Determining and Expressing Fineness of Feed Materials by Sieving." For chopped hay or rolled or flaked grain use the American Society for Testing and Materials (ASTM) standard E11. This standard defines a set of sieves suitable for measuring materials in which elongated particles dominate. Table 1 lists the ASTM sieve sizes.

In evaluating material reduction, consider a representative sample weighing 100 g. Use logarithmic probability paper to plot the cumulative percentage of weight retained on each sieve versus the size of the sieve opening. The point where the 50% cumulative percentage intersects the resulting straight line represents the geometric mean diameter.

The size of particles is reported in terms of geometric mean diameter and geometric standard deviation by weight. To calculate these values, use the following equations:

Table 1 Sieve designations and sizes

U.S. standard sieve number	Nominal sieve opening (mm)
4	4.76
6	3.36
8	2.38
12	1.68
16	1.19
20	0.841
30	0.595
40	0.420
50	0.297
70	0.210
100	0.149
140	0.105
200	0.074
270	0.053

$$D_g = \log^{-1}\left[\frac{\Sigma (W_i \log \bar{D}_i)}{\Sigma W_i}\right]$$

$$s_g = \log^{-1}\left[\frac{\Sigma W_i (\log \bar{D}_i - \log D_g)^2}{\Sigma W_i}\right]^{0.5}$$

where D_i = diameter of sieve openings of the ith sieve

D_{i+1} = diameter of the openings in the next larger than ith sieve (just above in set)

$\bar{D}_i$ = geometric mean diameter of particles on ith sieve

$= (D_i \times D_{i+1})^{0.5}$

D_g = geometric mean diameter

s_g = geometric standard deviation

W_i = weight fraction in ith sieve

Σ = summation symbol

Material passing U.S. sieve no. 270 (Table 1) is considered to have a mean diameter of 44 µm.

Plotting data on logarithmic probability graph paper generates graphical solutions for geometric mean diameter and log-normal standard deviation. Fig. 1 shows an example where:

$D_g = D_{50}$

= particle diameter at 50% probability

$s_g = D_{84} / D_{50}$

$= D_{50} / D_{16}$

= particle size at 84% probability divided by D_g

= D_g divided by particle diameter at 16% probability

or D_g = 350 µm

s_g = 640 / 350

= 350 / 191

= 1.83

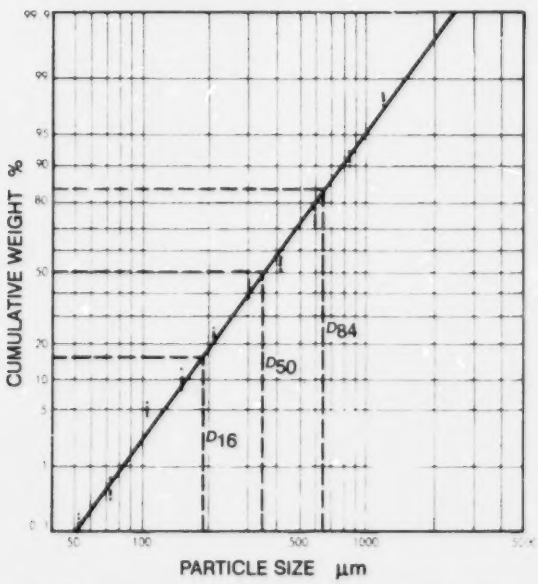


Fig. 1. Lognormal distribution for sorghum grain ground through a screen of 3.18 mm.

Table 2 presents particle sizes for the terms coarse, medium, and fine grind. The table also lists data for the modulus of fineness, which represents a weighted average of particle size. This measurement, although no longer endorsed by ASAE, still appears in product literature.

1.2 Kernel structure

A kernel of grain is a one-seeded fruit consisting of the germ, endosperm, and seed coat (Fig. 2). Sometimes nucellar tissue fills the space between the endosperm and the seed coat. The pericarp, or fruit coat, surrounds the kernel and strongly adheres to it.

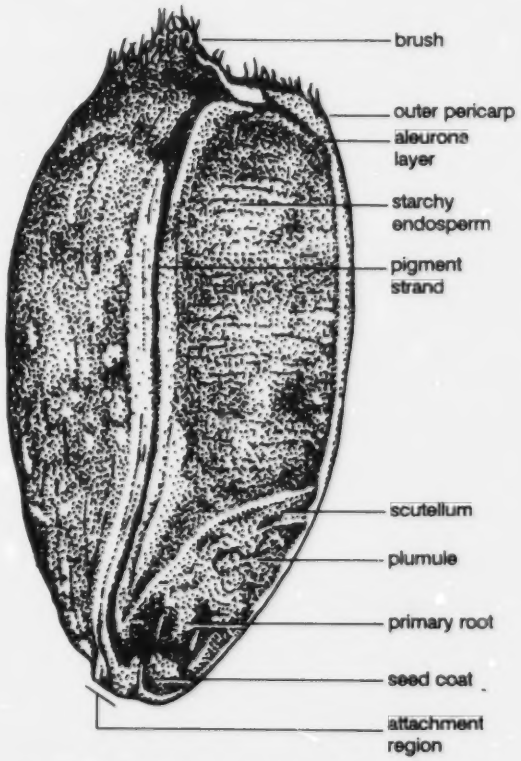


Fig. 2. Kernel structure of wheat.

Table 2 Quality of grind as related to particle size and modulus of fineness

Material	Whole grain	Coarse grind	Medium grind	Fine grind	Very fine grind
Grains					
Ear corn	–	6150 (4.8)	2630 (3.6)	1160 (2.4)	770 (1.8)
Shelled corn	14 100 (6.0)	6150 (4.8)	2680 (3.6)	1160 (2.4)	770 (1.8)
Barley	7070 (5.0)	3790 (4.1)	2030 (3.2)	1090 (2.3)	620 (1.5)
Oats	5000 (4.5)	2870 (3.7)	1650 (2.9)	950 (2.1)	580 (1.4)
Soybeans	14 100 (6.0)	6150 (4.8)	2680 (3.6)	1160 (2.4)	770 (1.8)
Wheat	7070 (5.0)	3790 (4.1)	2030 (3.2)	1090 (2.3)	620 (1.5)
Roughages					
Alfalfa hay	–	3540 (4.0)	1890 (3.1)	1020 (2.2)	580 (1.4)
Corn fodder	–	10 000 (5.5)	4060 (4.2)	1650 (2.9)	– –

Note: The numbers listed in parentheses indicate the values for modulus of fineness.

The pericarp forms a major part of what the miller knows as bran. It is composed of the outer epidermis and the inner mesocarp or hypodermis. Inside the hypodermis is the tribe cell layer. Tribe cells cover the entire kernel in corn (Fig. 3) but only certain parts of wheat and other grains. The outer surface of the epidermis is cutinized, making it relatively impervious to moisture.

The epidermis and hypodermis have no intercellular spaces. The closely adherent, thick-walled cells that make up these layers form a rigid, tubular domed arch that provides the kernel with good structural properties. In fact, the strength of the pericarp and the possibility of removing it in large pieces depend on these structural properties.

The endosperm is a continuous mass of tissue, in contrast to the pericarp, seed coat, and nucellar tissues which are discontinuous layers that adhere to one another. The endosperm cells of the outer layer are cubical in shape, have thick walls, and contain no starch. These cells, called aleurone cells, contain protein and oil. They are part of the bran.

The cells of the starchy, inner layer of endosperm are large and irregular, with little or no intercellular space. They are elongated with long axes radiating horizontally from the centre.

Milling breaks up endosperm cells. Less force is required to break the cell walls in the inner endosperm than in the outer because the inner cells contain chiefly starch whereas the outer cells contain chiefly protein. Also, the outer cells are smaller and their walls are thicker.

The microstructure of endosperm cells also affects milling. Within each endosperm cell lies starch granules embedded in a proteinaceous matrix. Particles of hard wheat flour are often composed of these endosperm cells. In soft wheat, the proteinaceous matrix is weaker, and the flour consists of individual starch granules plus pieces of the matrix.

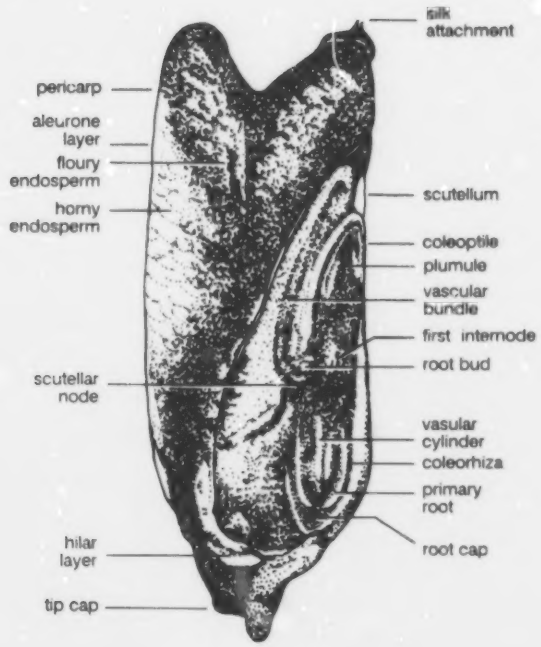


Fig. 3. Kernel structure of dent corn.

Dry milling produces wheat flour from the starchy endosperm of wheat kernels. However, the irregular thickness of the aleurone layer makes it difficult to scrape away all of the starchy endosperm in dry milling. Corn, on the other hand, mills more easily. The starchy endosperm of corn yields corn starch in wet milling and corn flour in dry milling.

The germ of the cereal grain kernel consists of the embryonic axis and the scutellum. The embryonic axis is an embryonic plant that develops at germination. The scutellum serves as a feeding organ for the germinating seed. The germ contains little starch, but a great deal of oil and protein. It is the source of wheat germ and corn oil. Because the germ is a separate structure, it easily detaches from the other structures of the kernel.

1.3 Mechanical and biological reduction

Mechanical reduction of the particle size of animal feeds enhances the animals' biological size-reduction processes, namely chewing and digestion. By striking the correct balance between the mechanical and biological regimens, operators can maximize the value and net returns from the feed. The balance point is reached when further mechanical processing fails to reduce the effort required by the animals to digest the food.

Mechanical size reduction physically disrupts the seed and aids biological processes by:

- increasing palatability
- reducing chewing
- increasing availability of starch for food energy
- increasing availability of nutrients

Excessive mechanical reduction, however, can lead to reduced feed conversion. For example, in some animals, fine grinding causes the feed to pass through the animal more quickly than normal. The feed does not stay in the digestive tract long enough for the fiber to be effectively digested.

The best method of mechanical reduction and the optimum size of reduced particles depend on the type of feed and the kind of animal involved. Table 3 summarizes information pertinent to making decisions regarding feed processing.

However, the ultimate level of mechanical size reduction depends mainly on net monetary return. Improvements in feed conversion afforded by mechanical processing must exceed the cost of processing to justify costs and return a profit.

2 REDUCTION METHODS

Reducing the size of grain particles in feed manufacturing is important for several reasons:

- to limit the amount of feed passing through the animal undigested
- to remove unpalatable waste from feed
- to increase palatability of feed
- to facilitate mixing and balancing of rations
- to increase digestibility of feed by allowing more intimate mixing of feed with digestive fluids
- to improve pellet quality

In feed manufacturing, two systems are most common for reducing particle size: hammer mills and roller mills.

2.1 Hammer mills

2.2 *Design and operation* The hammer mill is the most popular machine used to reduce the size of feed particles. It grinds both grains and forages.

Table 3 Process recommendations for livestock feed

Animal	Grain	Forage	Comments
Beef cattle	Dry or steam roll, or grind coarsely Fine grinding is not recommended as it can increase the incidence of ruminal parakeratosis in feedlot cattle	Long hay satisfactory for other than commercial feedlots Chopped (50 mm), cubed or pelleted forage in commercial feedlots or where hay quality is poor. This kind of forage handles easily and results in minimal wastage Fine grinding of hay decreases digestibility	Dry or steam rolling or coarse grinding of grain equally suitable for most beef cattle Grain need not be processed for calves under 6 months because they masticate feed thoroughly
Dairy cattle	Grinding is simplest and most widely used processing method Dry or steam roll, or grind coarsely for dry cows, young stock, and low-producing cows	Long hay, cubes, or chopped silage	Finely ground roughage results in reduced rumen acetate production and lower milk fat production
Sheep and goats	Processing not required unless seeds are hard or teeth are poor	Chop to 50 mm long	Sheep and goats masticate their feed more than cattle so processing is not required
Swine	Finely grind corn, oats barley, and grain sorghum Medium to coarse grind is preferred for wheat because fine grinding makes it pasty and less palatable	Legumes to be used in mixed feed should be finely ground	Fine grinding can cause bridging in self feeders Fine-ground feed has been associated with stomach ulcers
Poultry	Grind mash medium fine	Grind hay	
Horses	For horses with good teeth processing improves the value of oats 5 %	Long hay	Horses should not be fed dusty feed

Source: Ensminger and Olentine (1978).

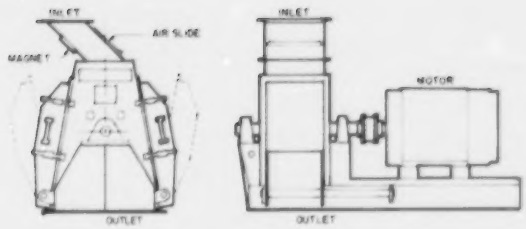


Fig. 4. Hammer mill detail.

Fig. 4 shows two views of a typical hammer mill. The grinding action results from the impact of free-swinging hammers that rotate on a shaft. The hammers strike the material as it enters the mill and wherever it encounters an obstruction that redirects its flow into the hammers' path.

Material for grinding enters the hammer mill from the top. At the inlet, various devices control the feed rate, remove tramp metal and other foreign material, and provide an air inlet.

Then, as the material moves into the grinding chamber it is struck by the rotating hammers. The reduced particles then begin to rotate in the chamber, guided by the shape of the screen and driven by the hammers. A moving layer of material develops. Its inner portion moves at a high velocity because of the nearby hammers whereas the outer portion is slowed because of friction with the screen. When particles adjacent to the screen reach a size smaller than the screen opening and slow sufficiently, they fall through the screen and are discharged from the grinding chamber. Fig. 5 illustrates particle motion between the screen and the hammers.

In most hammer mills, material enters the mill on a near tangent to the hammer arc or drops directly down onto the hammer. Fig. 6 shows two common inlet designs (*a* and *b*) and the impact locations for full-screen grinding chambers.

A design feature now popular in hammer mills is a cutting plate, sometimes called the breaker bar or breaker plate. This device reduces the particle size before it enters the screen area.

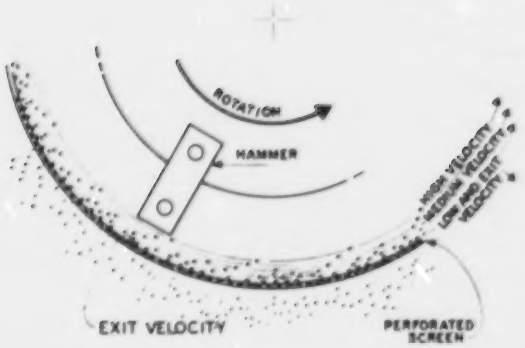


Fig. 5. Particle motion between screen and hammers.

As a result, the hammer mill can achieve a higher throughput capacity with a smaller screen area. A cutting plate is especially useful for grinding fibrous or otherwise hard-to-grind material. The cutting plate also interrupts particle flow and directs material into the path of the hammers. Fig. 6*c* illustrates this style of grinding chamber and the characteristic particle motion.

To operate a hammer mill most efficiently, pay attention to these items:

- type of material
- screen and hammer design
- speed of rotation
- method of conveying finished material
- effect of the material's moisture content on grinding
- method of feeding
- installation and maintenance

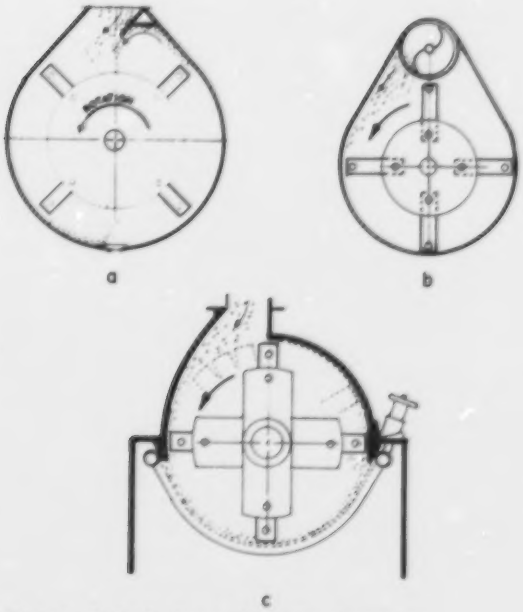


Fig. 6. Inlet design and grinding locations.

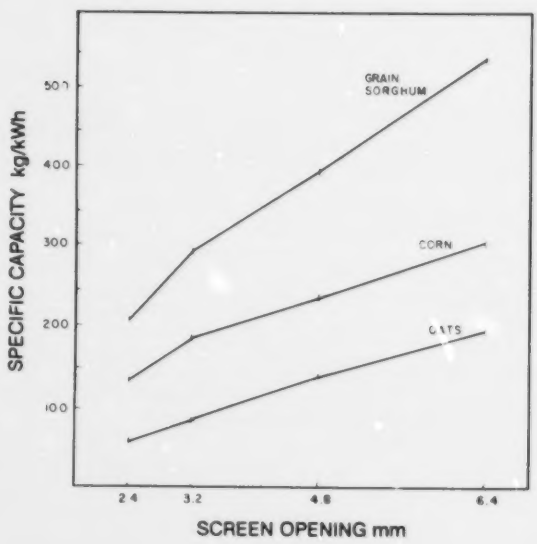


Fig. 7. Effect of the kind of grain on mill specific capacity.

2.3 *Product types* The grains used in feed manufacture fall into two general categories:

- Fibrous, nonfriable grains such as oats, refuse screenings, legumes, and forages such as alfalfa are considered hard-to-grind materials.
- Nonfibrous, friable grains such as corn, wheat, barley, milo, and oil cake are considered easy-to-grind materials.

Nonfibrous and friable grains are relatively easy to grind because of their fragility. At the same time, they are usually very dense. The fiber content of fibrous and nonfriable grains makes them more difficult to grind.

Mills that handle easy-to-grind grains should be equipped to convey the finished product away. Hard-to-grind grains require more energy to reduce them, so consider factors that improve the quantity of product ground per unit of input power. Fig. 7 shows the power requirements for grinding various grains: easy-to-grind corn and grain sorghum, and hard-to-grind oats.

2.4 *Screen design* Three variables influence the design of hammer mill screens:

- size of screen openings
- position of the screen
- effective screen area

The use of screens results in uniform grinding. Screens ensure uniform grinding, by generating an average particle size that is smaller than the opening diameter. Materials remain in the grinding chamber until the particles are small enough to fall through the screen. Increasing the size of the screen openings reduces the time material stays in the grinding chamber and so results in a coarser end product. However, capacity increases when the size of the screen openings increases. In Fig. 8, the capacity for a system grinding shelled corn almost doubles when the screen size changes from 2.4 mm to 6.4 mm.

The screen is positioned around the grinding chamber of most hammer mills in one of two ways. The most popular arrangement is with the screen circling the grinding chamber almost 360°. Manufacturers claim the greater screen area provided by this design reduces the quantity of material rotating inside the screen and permits properly sized particles to drop out more quickly. This arrangement is suitable for processing more hard-to-grind material.

The other configuration is to place the screen across the bottom 180° of the grinding chamber. This design makes changing the screen easier. As well, it allows operators to turn the screen, exposing new sharp edges. Fig. 6 shows examples of screen locations.

Screen area affects grinding efficiency. In fact, screen area limits the ultimate capacity of a hammer mill, regardless of the input power. Some manufacturers sell a particular mill size

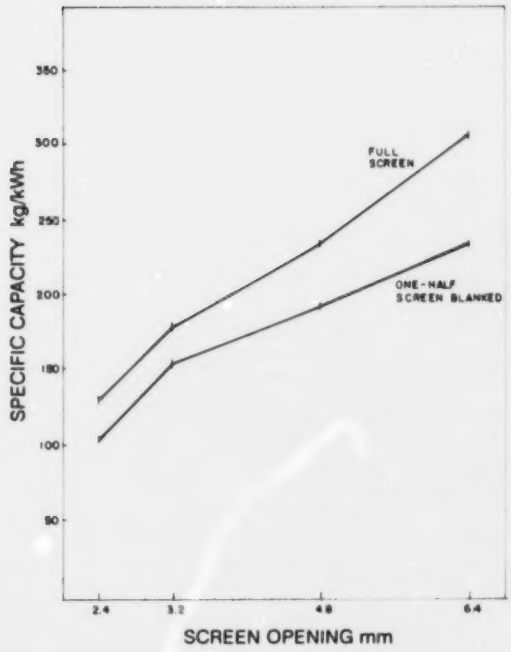


Fig. 8. Effect of screen opening size on specific capacity for mills grinding corn.

with a range of input powers. More often, though, the supplier provides various mill sizes for a given input power.

Reducing screen area while retaining constant input power decreases capacity and generates more heat and fines. Blanking off one half of the screen area reduces mill capacity, regardless of the screen size used. In Fig. 8, for example, reducing the screen area to one-half decreased production by almost 60 kg/kWh for shelled corn on a 4.8 mm screen.

The effective screen area refers to the area through which ground material can pass. Use a screen with the maximum effective screen area. The typical screen uses a staggered hole pattern. The spacing between holes, measured between respective centres, is equal to or slightly less than the hole diameter. Thicker screens tend to reduce capacity.

Some manufacturers supply specially fabricated screens with opening axes at an angle to the screen surface. This configuration provides a more direct path for the particles than do screens made with openings 90° to the direction of flow. Independent quantitative information on the benefits of such specialty screens, however, are not available.

2.5 *Hammer design* Size reduction in a hammer mill takes place at the point of impact between the product and the hammer surface. Choose the correct hammer size, style, and arrangement to ensure the desired particle size at optimum capacity. For hard-to-grind materials, the choice is even more crucial.

The most suitable number and size of hammers depends on the characteristics of the material to be reduced and the design of the hammer mill. To establish an appropriate configuration, the mill operator must consider several factors:

- the number of hammers installed
- the types of product being ground
- the respective quantities of each material for grinding

At the same time the operator should ensure the mill uses all the available screen area.

Most operators use more hammers for fine grinding. For coarser grinds in a mill of fixed rotor speed, removing some hammers generally produces a coarser end product without changing the screen size.

Experience shows that thin hammers grind most materials more efficiently than thick hammers. Thin hammers expose sharper cutting surfaces more frequently than thick hammers. On the other hand, thick hammers resist wear better than thin ones.

Fig. 9*a* shows the effect on capacity of changing the thickness of small hammers. Fig. 9*b* shows the effect on capacity of changing the thickness of larger hammers. The conclusion from these two charts is that narrow hammers grind more efficiently than do wide hammers.

For optimum grinding performance and longevity, use a thick, sharp hammer. The so-called hard-faced hammers offer this combination. These hammers are tipped with a very hard steel alloy, such as tungsten carbide, and are heat treated. The hammer has a soft centre yet an exceptionally hard outer surface. The hard steel alloy tip causes undercutting, which develops a sharp edge. Because of the soft centre, the forward surface wears in a concave shape thus producing additional sharp cutting edges. Fig. 10 compares the wear patterns of hard-faced hammers with standard hammers.

The 6.35-mm hard-faced hammer is probably the most popular type used in North America. Virtually all mills can accommodate it with good results.

How the hammers are arranged affects wear of both the screen and the hammers across the rotor. Use a staggered hammer arrangement for uniform use of the whole screen; otherwise the screen wears in striations.

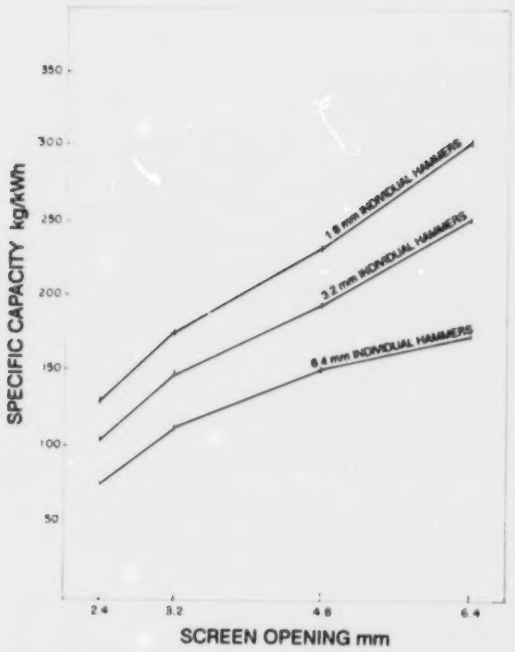


Fig. 9a. Effect of small hammer size on mill specific capacity.

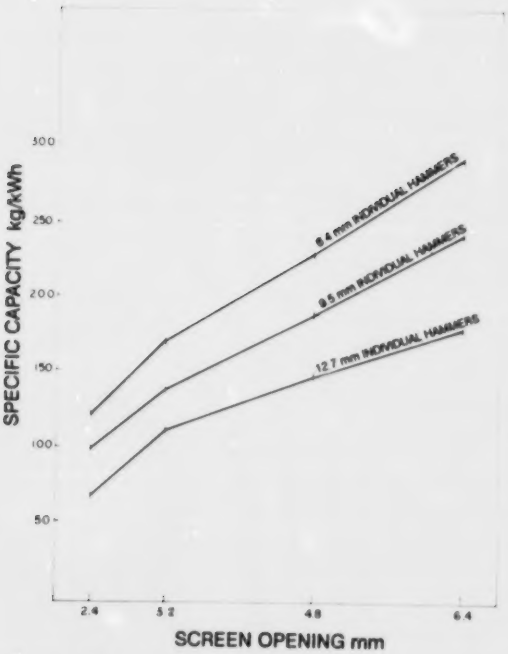
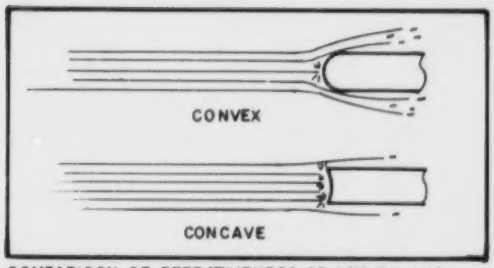


Fig. 9b. Effect of large hammer size on mill specific capacity.

COMPARISON OF WEAR PATTERNS



COMPARISON OF EFFECTIVENESS OF CONVEX AND CONCAVE CUTTING SURFACES.

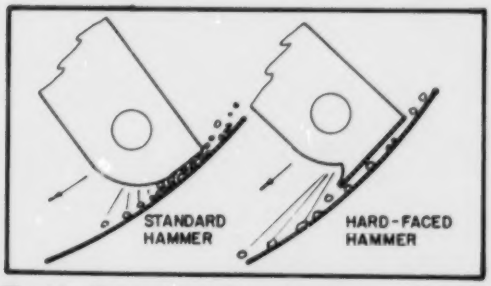


Fig. 10. Comparison of standard and hard-faced hammers.

As well, arrange the hammers so excess material does not collect in a single area of the rotor. Often the hammer pattern directs more product to the outer portion of the rotor causing faster wear on the outside hammers.

The hammer-to-screen (H/S) clearance also affects hammer mill performance. A small H/S clearance causes material rotating against the screen in the grinding chamber to move quickly. Dragging the hammers through the layer of material causes more impact on the particles, more fines, and faster wear on the hammers and screen. Increasing H/S clearance draws the hammers out of the moving particle layer, reducing its velocity and thereby allowing quicker exit from the grinding chamber. This arrangement produces fewer fines and controls hammer and screen wear.

Experience indicates that reducing the full complement of hammers by 25% increases efficiency up to 10% on some mills. Combining this improvement with an increase in H/S clearance significantly improves efficiency for the mill (Fig. 11), provided coarse grinding is acceptable. However, these actions do not suit every situation. Rely on trial runs before the mill goes into full operation to set the conditions for optimum results.

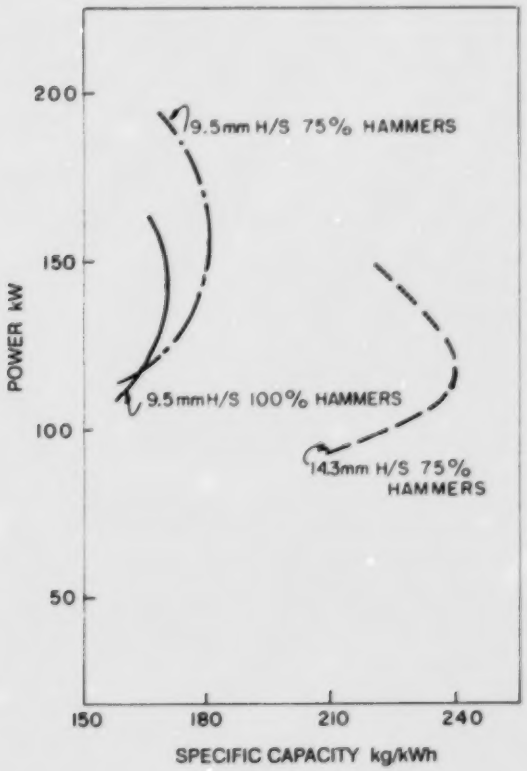


Fig. 11. Effect of hammer-screen clearance and number of hammers on mill performance. Source: Koppers Co., Inc.

2.6 *Speed of rotation* Hammer mills used in North America are classified as either high speed (3600 r/min) or low speed (1800 r/min), based on the speed of the rotor. High-speed mills generally use a small-diameter rotor; low-speed mills use a large-diameter rotor.

The speed of the hammer tips is approximately equal for various manufacturers and for different rotor speeds. It is the velocity of the hammer tips which determines the effectiveness of the mill. Table 4 lists typical hammer rotor diameters and operating speeds.

Most mills operate with direct-drive, flexible couplings that fix the operating speed. If a belt drive is used, the actual rotor speed can be adjusted to meet optimum conditions, but high-power belt drives are expensive and bulky.

Table 4 Hammer mill operating speeds

	Rotor diameter (mm)	Tip speed (r/min)	Tip speed (m/min)
A	460	3600	5180
B	530	3600	6040
C	610	3600	6890
D	760	1800	4300
E	910	1800	5180
F	1070	1800	6040
G	1220	1800	6890

Note: Although mills *C* and *G* operate with similar hammer tip speeds, they will not necessarily produce similar results. Because the housing curvature is much greater for mill *C*, high centrifugal forces direct product outwards against the screen thus improving grinding efficiency. Centrifugal force would be considerably less in mill *G*.

Choose high-speed mills with smaller diameter rotors for fine or hard-to-grind materials. For fine grinding on screens with openings less than 3.2 mm, use a high-speed rotor for greater capacity. Low-speed operation is clearly superior for coarse grinding. At high tip speeds material moves around the mill parallel to the screen surface, making the openings only partially effective. At slower speeds material impinges on the screen at a greater angle causing greater amounts of coarser feed to pass through.

Fig. 12 shows the effect on capacity of changing the speed of a single-hammer mill reducing shelled corn.

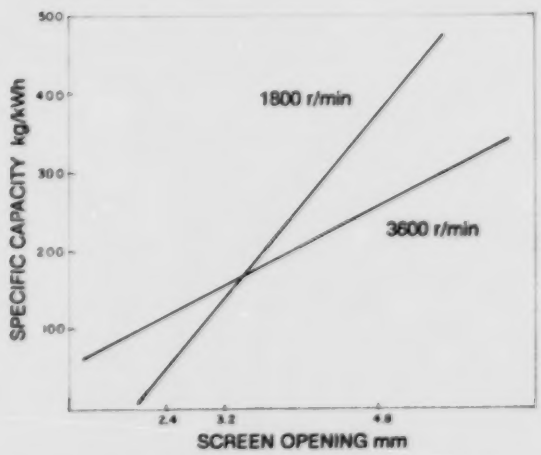


Fig. 12. Effect of rotor speed on the specific capacity of a mill grinding shelled corn. Source: Canadian Feed Manufacturers Technology.

2.7 *Air in the grinding process* For most hammer mills air flowing through the screen improves operations. Rotating hammers act as a fan and build up air pressure against the screen. Consequently air, dust, and some material blows through the screen.

Ensure that air flows through the screen to:

- prevent the screen from blinding
- prevent heat buildup
- increase capacity
- provide dust control

A lack of airflow through the mill allows moisture to accumulate as it is released from the grain during grinding. Accumulating moisture causes the ground material to clump and block the screen. Good airflow through the mill dissipates accumulating moisture, and prevents clogging.

When screen openings are smaller than 2.75 mm, good airflow is particularly beneficial. Clogging often occurs on these screens because of the fine grind of the material they handle.

During cold weather, moisture further aggravates the problem of screen blocking, especially when temperatures drop below freezing.

Good airflow through the mill reduces the temperature rise that occurs during grinding. Fig. 13 compares the temperature rise in grinding shelled corn through a 2.4-mm screen in mills with and without airflow. When air flows through the mill, the temperature rises 2.4°C. In contrast, the temperature rises 9°C when no air flows.

Increasing airflow also allows the mill to approach its maximum grinding capacity, especially on hard-to-grind grains such as alfalfa and oats. Fig. 14 illustrates an example of grinding with and without air. The additional airflow increases the grinding capacity by 10–15% in this case.

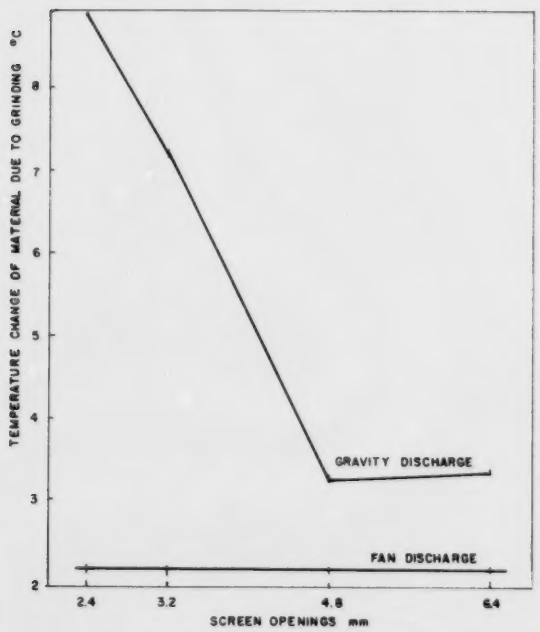


Fig. 13. Effect on gravity discharge and fan discharge of temperature increase due to grinding.
Source: Canadian Feed Manufacturers Technology.

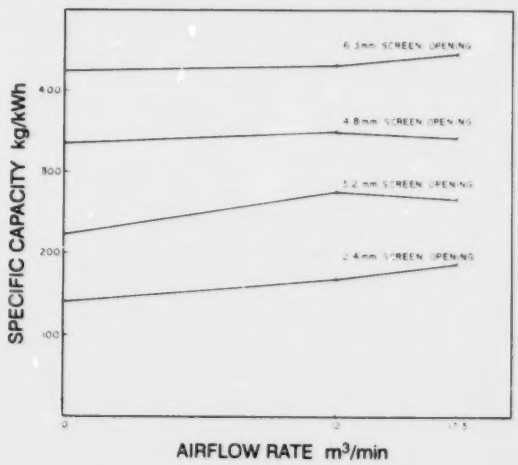


Fig. 14. Specific capacity vs. air flow rate.
Source: Canadian Feed Manufacturers Technology.

The amount of air required for optimum mill performance and economy is difficult to establish. Hammer mill manufacturers rely on this rule of thumb: 200–400 L of air per minute per kilowatt of grinding power.

2.8 *Moisture content* Moisture content of material entering a hammer mill significantly affects the mill's throughput capacity. A slight rise in moisture content causes a large decrease in specific throughput. The meal produced from grain with higher moisture content is slightly coarser than meal produced from grain with a lower moisture content. Moisture that is released during milling can condense in bins or conveying systems and impede flow. Sufficient airflow through the mill normally overcomes any difficulties caused by moisture release.

Table 5 shows the relationship between power requirements and moisture content for two conventional mills. Mill *A* is a medium-powered mill; mill *B* is much larger. To retain a constant throughput, mill *A* required 59% more power to handle material with 6% more moisture than previously. Similarly, mill *B* required 34% more power to handle 7% more moisture.

Table 5 Relationship between power requirements and moisture content for two conventional hammer mills

Mill	Moisture content				
	12%	13%	15%	17%	19%
	Power requirement (kW)				
A	–	7.4	10.1	11.6	11.0
B	24.4	–	28.0	30.6	33.6

Note: Both mills are processing barley. The output of mill *A* is 279 kg/h. The output of mill *B* is 1092 kg/h.
Source: Thomas (1958).

Fig. 15 compares the efficiency of grinding corn at a normal moisture content with grinding corn at a high moisture content. In this example, the mill uses a 3.2-mm screen. The mill grinds about 46 kg/kWh less corn when the grain enters the mill at a high-moisture content than it does with corn at normal moisture levels. When grinding wheat, a similar pattern emerges (Table 6).

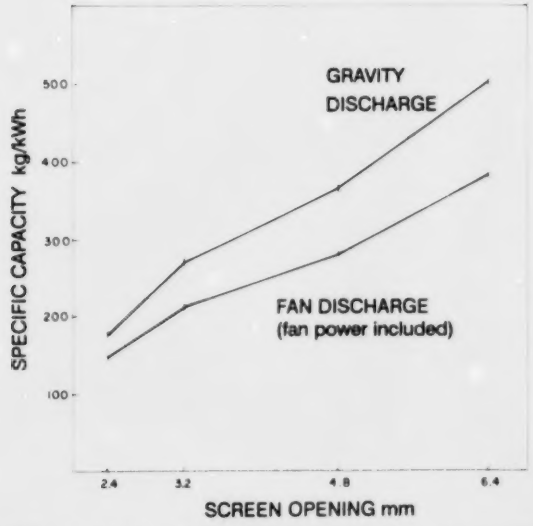


Fig. 15. Effect on gravity discharge and fan discharge of moisture content of the grain for a mill grinding corn. Source: Canadian Feed Manufacturers Technology.

2.9 *Method of feeding* Hammer mills are loaded by force feeding or gravity feeding. Both methods aim to load the mill fully and to deliver grain at a uniform rate.

Always control the rate of loading. Never overfeed a mill. A hammer mill is fully loaded when the ammeter indicates the motor is drawing its rated amperage.

Table 6 Relationship between mill output and moisture content for wheat in a mill using a 3-mm screen

Moisture content (%)	Specific output (kg/kWh)
13	66.0
15	56.6
17	48.7
19	40.8

Source: Summerfield (1984).

Most commonly, material enters a hammer mill through a manually operated slide gate on the feed spout. This system works best if the material flows freely and contains no foreign material such as straw. Otherwise the feed rate is erratic and the feed spout plugs. To correct these problems operators often set the feed rate very slow, but the mill then becomes underutilized.

To match feed rate to mill capability most accurately, use a feeder mechanism that delivers a predetermined amount of material. The feeder should be as wide as the mill inlet so that the grain is uniformly distributed across the grinding area. With this mechanism the operator can set the intake rate for constant full load without concern for surging, which causes plugging.

Feeder mechanisms are either driven off the mill motor through a variable-speed transmission or from a separate, variable-speed motor drive. The second option allows the feeder to interlock with the mill motor. In this configuration, feeding automatically stops if the mill overloads and continues only when the mill clears itself, as indicated by a reduction to a normal current reading on the ammeter.

An air syphon offers additional benefits to feeders. The syphon removes heavy, nonmetallic foreign objects from the material to be ground. These objects can damage the hammers and screen if they pass into the grinding chamber.

To keep metal from entering the grinding chamber, expose all material entering the hammer mill to a magnet before it reaches the grinding area. Install a baffle upstream of the magnet to slow the material flow enough that the magnet captures all ferrous material. Clean the magnet regularly to maintain adequate performance. A magnet loaded with metal loses its effectiveness. Any metal that enters the grinding chamber causes damage

and premature wear to the mill. It can also restrict intake.

2.10 *Conveying finished product* Hammer mill installations are characterized by either gravity discharge or pneumatic discharge. Gravity-discharge systems operate independently from the grinding function; pneumatic discharge can affect grinding. The two discharge methods can be further subdivided as follows:

- gravity discharge into a bin
- pneumatic gravity discharge
- mechanical gravity discharge
- pneumatic discharge with a directly connected fan
- pneumatic discharge with a separate, motor-driven fan

Avoid a system that relies on gravity to discharge the hot product directly into a bin. This discharge method creates a continual fire hazard; conveying the finished product allows time for any hot parts to cool. Discharging directly into the bin also necessitates placing the grinder on the upper floors. Monitoring then becomes difficult, and the bins for raw material have to be installed at even higher levels, resulting in an extremely tall configuration. Moreover, because gravity discharge allows air to enter at the mill inlet, dust collected with this arrangement can reenter the process downstream of the mill.

Alternatives to directly discharging material into a bin include:

- discharging into a pneumatic conveying system using positive pressure and a rotary air lock feeder
- discharging into a pneumatic conveying system using a negative pressure line with an open air intake
- discharging into a mechanical conveying system

Pneumatic conveying consumes about four times more power than does mechanical conveying with a screw or drag conveyor and a bucket elevator. The extra power needed to operate the pneumatic system may reach one-third of the total power consumed in grinding. Fig. 16 compares the specific capacity of a gravity discharge mill with that of a pneumatic discharge mill.

All types of pneumatic discharge and conveying systems require dust collectors to separate the ground material from the air before the material enters the bin. See Agric. Can. Publ. 1832/E *Air and Pneumatic Conveyors* for more information on pneumatic conveying.

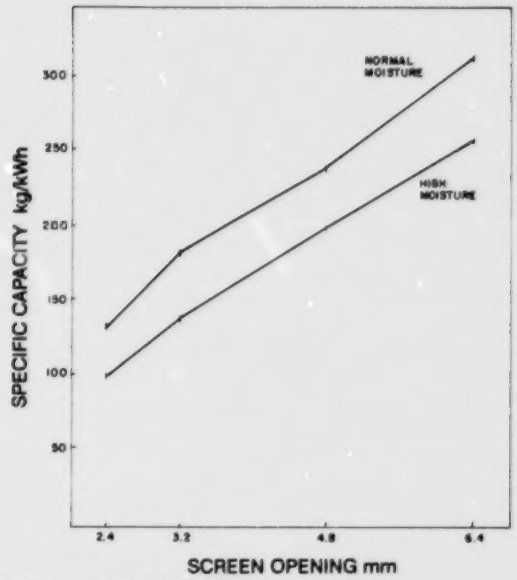


Fig. 16. Specific capacity for fan and gravity discharge. Source: Canadian Feed Manufacturers Technology.

In hammer mills, at least 50% of the air required for conveying passes directly through the mill with the material.

Fine grinding and grinding forages or hard-to-grind grains require airflow through the screen to prevent clogging. Pneumatic discharge best accommodates the two functions of conveying and increasing grinding capability. As well, choose suction pneumatic discharge for fine grinding below 2.8 mm. Either gravity or pneumatic discharge can work effectively on easy-to-grind and coarse materials.

The plant layout and the type of grinding to be done generally determines the form of discharge and the selection of conveying system.

Fig. 17 illustrates three methods for discharging and conveying material from hammer mills:

- pneumatic discharge
- gravity discharge with mechanical conveying
- gravity discharge with pneumatic conveying

2.11 *Dust control* Grinding produces a great deal of dust. Recovering the dust is important for several reasons:

- to maintain good health
- to observe air pollution regulations
- to recover a valuable product

Consider a grinding operation that produces 2000 t of finished product per year. If 5% of the material is lost in dust, the annual production loss is 100 t of feed.

Any decision not to install a dust control and recovery system in a hammer mill warrants careful economic evaluation.

2.12 *Installation, maintenance, and safety* Install hammer mills on a level structure or floor. Use machinery-mounting pads made from rubber or neoprene compounds to isolate the mill from the surrounding structure. This arrangement extends bearing life and reduces noise transmission. Use soft rubber or silicone seals at the connection points in transitions to and from the mill. These seals (Fig. 18) help keep welds from breaking or metal from cracking as a result of mill vibration.

For safety, incorporate an automatic shutoff switch on the mill doors. A micro-switch senses door position and prevents the mill from starting if one of the doors is not properly closed or stops the mill if a door opens while it is running.

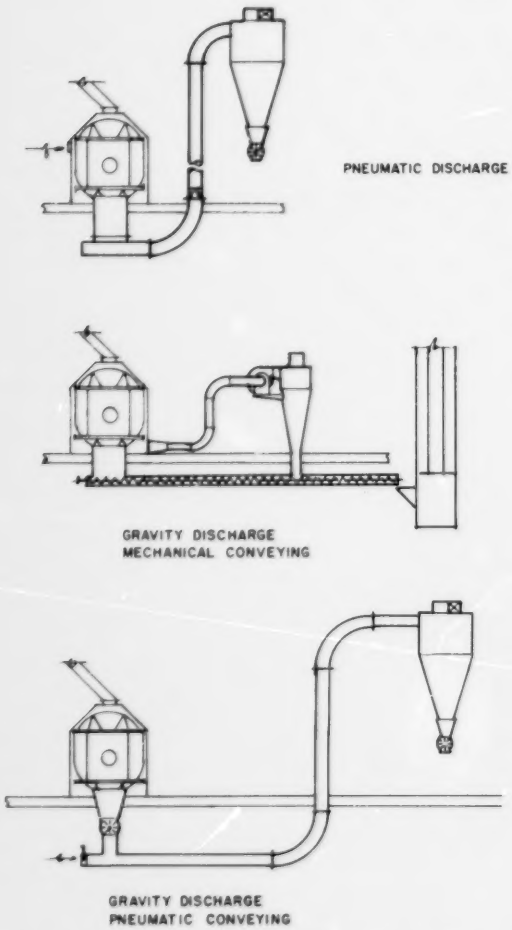


Fig. 17. Hammer mill discharge and material-conveying methods.

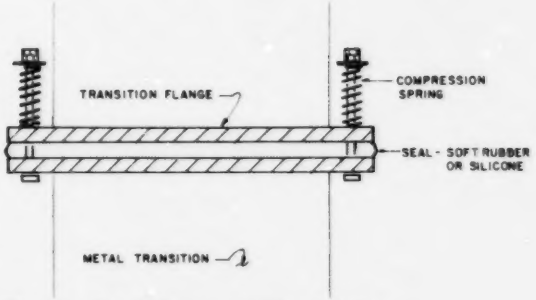


Fig. 18. Transition connection detail.

Also provide mills that run unattended for any length of time with a vibration sensor switch. This switch automatically breaks the power circuit if excessive vibration occurs. An ammeter that interlocks to the magnetic starter and shuts down automatically in case of overload is also recommended. Include in this circuit a warning device to indicate danger. Locate thermistors in the motor winding to stop the mill if any components overheat.

Hammer mill maintenance should include regular inspection of all parts susceptible to wear. Pay careful attention to lubrication requirements.

Most mills have many internal wear plates that direct the flow of material or hold various components in place. Check directional feed gates for wear and replace them when necessary. Also, many mill designs include plates to hold the screen in place inside the grinding chamber. If these plates wear excessively, the screen moves close enough to the hammers to get hit. In such a case the mill itself can be damaged.

Hammers wear quickly so change them regularly. If hammers wear unevenly, adjust the intake mechanism so the material feeds more evenly over the full width of the hammers. Replace any hammers worn on one side past centre. Don't simply reverse them. Continuing to use badly worn hammers can result in one breaking loose and causing severe damage to the mill or injury to bystanders. Check the hammers for wear and elongation of the pin holes. If the hammer moves on the pin more than 1.6 mm toward the rotor shaft, replace the hammer or pin immediately.

Rounded perforation holes characterize worn screens. Many operators judge a screen to be worn out when the motor amperage for a given flow of material increases by more than 10% over original readings.

Five conditions generally account for excessive vibration in hammer mills:

- improper hammer arrangement
- missing or broken hammers
- excessively worn hammers
- loose hammer pins
- hammers that fail to swing freely

Run the mill without any hammers installed to determine whether the problem is in the hammers or rotor. Check the rotor for excessive wear or cracks in the metal and replace it as required. Replace noisy bearings as soon as possible. Check the lubrication of overheating bearings and replace as required. Hot bearings are a prime cause of feed mill fires and explosions. Devices to detect bearing heat are worthwhile if the mill operates unsupervised.

2.13 *Selection* The major factor in selecting a hammer mill is throughput capacity in tonnes per hour. As a guide, match capacity to weekly demand. Then, identify manufacturers offering mills with the appropriate capacity, and select a mill according to durability and availability of special features such as ease of screen change or ease of servicing and changing hammers. If the fundamentals of hammer mill operation are correctly applied, almost any make of mill does an effective job.

2.14 Roller mills

Roller mills are precision machines that reduce the size of feed particles. They provide finely controlled grinding with fewer fines than any other type of size-reduction equipment. Rather than completely breaking down the kernel, as in a hammer mill, roller mills merely cut open the hull (endosperm) to expose the internal portions of the grain. Roller mills can be used to process virtually any grain type.

The terms cracking, granulating, crimping, and flaking commonly describe the actions of roller mills. Cracking, granulating, and grinding refer to reduction of particle size. Flaking and crimping refer to the flattening of particles. Flaked particles are thinner than crimped particles, and the feed must spend considerable time in a steam chest to soften the kernels before they are rolled. Roller mill action on incoming grain ranges from mild to harsh treatment, yielding material 4 to 140 mesh size (Table 1).

Roller mills are characterized by their low power requirements and their unique action on the grain.

2.15 *Design and operation* Roller mills consist of one or more pairs of rolls arranged in parallel. Additional pairs of rolls, for flaking or for increasing the capacity of the mill, stack on top of the primary pair. Each roll pair is always of equal diameter. The smallest rolls available are 150 mm in diameter and 150 mm long. The largest are 710 mm in diameter and 1320 mm long.

The rolling mill frame should allow the rolls to be easily removed for regrooving. However, on most mills, roll removal is laborious. So if the operation requires more than one type of roll, consider installing two mills.

Of the pairs of rolls, one roll mounts rigidly whereas the second adjusts to vary the degree of reduction or flattening and to compensate for gradual reduction in roll diameter caused by regrooving. A spring-release mechanism generally equips the adjustably mounted roll. This setup reduces damage to the rolls from stones or bits of metal that may accidentally enter the mill.

A feeder distributes material uniformly across the width of the rollers. Scrapers prevent buildup of material on the rolls when processing high-moisture grain or during steam rolling.

Fig. 19 shows a schematic view of the internal parts of a typical roller mill. Fig. 20 shows a side view of an industrial style mill.

2.16 *Operating characteristics* For a given material, these factors in particular affect the mill's operating characteristics:

- roll types
- roll grooving
- roll spacing
- roll speed, especially the difference in speed between individual rolls

2.17 *Roll types* Because the cost of rolls represents one-third to one-half the purchase price of most roller mills, match the quality of the rolls to their intended service. Choose rolls of hardness from 45 to 55 as measured on the Rockwell C scale.

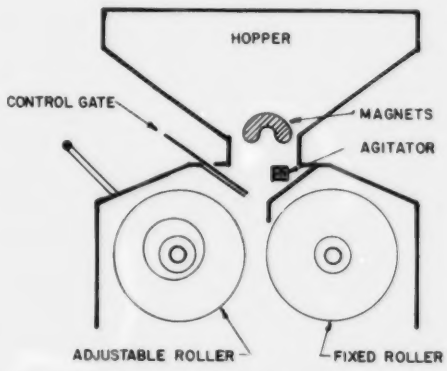


Fig. 19. Cross section of a roller mill.

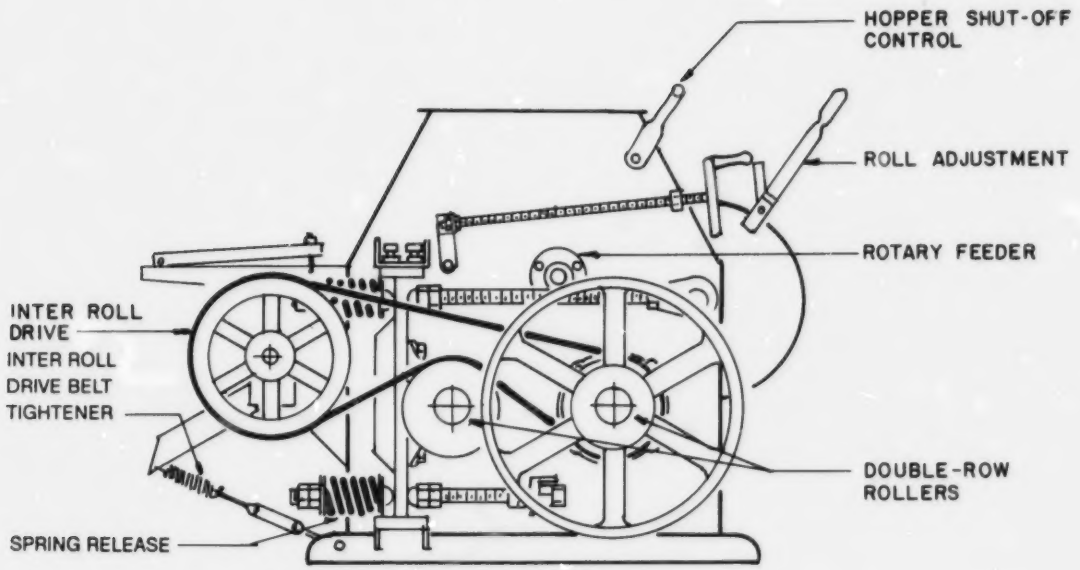


Fig. 20. Side view of an industrial roller mill. Source: Roskamp Manufacturing, Inc.

Three types of rolls are commonly used:

- hollow tube rolls, made of cast iron or steel
- alloy white-iron rolls, solid to the shaft
- chilled cast-iron rolls, either solid or partially hollow

Hollow tube rolls are intended for farm use. They are the least expensive of the three types, but they are the most susceptible to fracture from shock. Hollow rolls are generally heat treated by the case-hardening process. This treatment follows the machining of the grooves. Dimensional properties of hollow tube rolls vary substantially. Consequently, they may grind unevenly and vibrate excessively. Moreover, the ability of hollow rolls to be regrooved is limited.

Alloy white-iron rolls are cast solid around the shaft, so they are hard to the core. These rolls are machined and grooved in the hardened state with special carbide tools. This type of roll can withstand regrooving up to 15 times. The exact number of regroovings depends on the wear of grooves and their size, and on how much the roll diameter can be reduced without sacrificing grinding quality. With solid-cast rolls, material grinds more evenly and the mill operates with less vibration and bouncing.

Chilled cast-iron rolls are the highest-quality rolls and the most expensive. This hardening process is most often used on rolls 300 mm in diameter and larger. The rolls are hardened about 16 mm deep and can be regrooved up to 10 times.

A good-quality, solid pair of rolls should process from 15 000 to 18 000 t of grain before regrooving is necessary. When rolls dull, power consumption increases and the grind quality decreases. Always regroove rolls as a pair.

2.18 *Roll grooving* The type of roll grooving determines the characteristics of the rolled product. Coarser grooving produces more cutting and chopping. Finer grooving gives a flatter material. The cutting and chopping action of coarse rolling requires less power than fine milling because less actual work is done to the kernel. As rolls wear, grooves become less effective; thus more flaking results and mill capacity decreases. Table 7 relates capacities to roll grooving, roll size, and power requirements.

The number of grooves per 25.4 mm of circumference (grooves per inch) characterize rolls. Rolls are available with 4.5–30 grooves per 25.4 mm. Some large-diameter rolls (300 mm) operate without any grooves. The more grooves, the larger the diameter of the roll required to allow the grain to pass through the rollers under a given pressure.

For rolling grain of less than 15% moisture (dry rolling), use rolls with 4.5–6 grooves per 25.4 mm to crack grain coarsely for cattle and poultry feed. For cracking sorghum, use rolls with 10–13 grooves per 25.4 mm. Rolls with 13–18 grooves per 25.4 mm crimp barley, oats, and wheat. For steam rolling corn, use rolls with 16 grooves per 25.4 mm. Rolls with 18–22 grooves per 25.4 mm suit steam rolling of other grains.

Table 7 Capacity of a roller mill as a function of roll grooving, roll size, and power requirements

Roll size (in.)	Grooving per 25.4 mm	Power (kW)	Capacity (t/h)	
			Corn	Oats, wheat, or barley
	Dry rolling (coarse product)			
9 × 30	5.5	15	27	–
9 × 30	11	15	18	6
9 × 30	15	15	13	4
12 × 30	16	18.6	14	5
16 × 30	18	22.4	22	6
	Steam rolling (thin flake)			
12 × 30	18	18.6	2	4
16 × 30	18	30	4	5
16 × 36	18	37.3	5	7
18 × 36	18	45	7	9

Source: Larson (1978b).

For processing both corn and small grains, the most popular configuration is the two-pair roller mill (Fig. 21). This configuration consists of a top bank of rolls with 5 grooves per 25.4 mm and a bottom bank with 14 or 15 grooves per 25.4 mm. It yields good results with most types of grain. A single-pair roller mill equipped with rolls having 18 grooves per 25.4 mm offers an alternative multipurpose setup.

A subtle refinement on the basic longitudinal groove pattern is to introduce a slight spiral to the roll, 12–25 mm from end to end. This change smooths mill operation by providing a scissoring action. Another roll pattern features one roll with longitudinal grooves and the other with circumferential grooves (Fig. 22). This arrangement dices material.

Other rolls are available with only 2–4 grooves per 25.4 mm. These grooves are cut only 1.5 mm deep and produce noncorrugated flakes. Yet the rolls still grab the material passing through the mill.

Most grinding service companies have established groove spacings and patterns.

2.19 *Roll spacing* It is easy to adjust roll spacing. Reducing the spacing between the rolls yields a more finely ground material and decreases output.

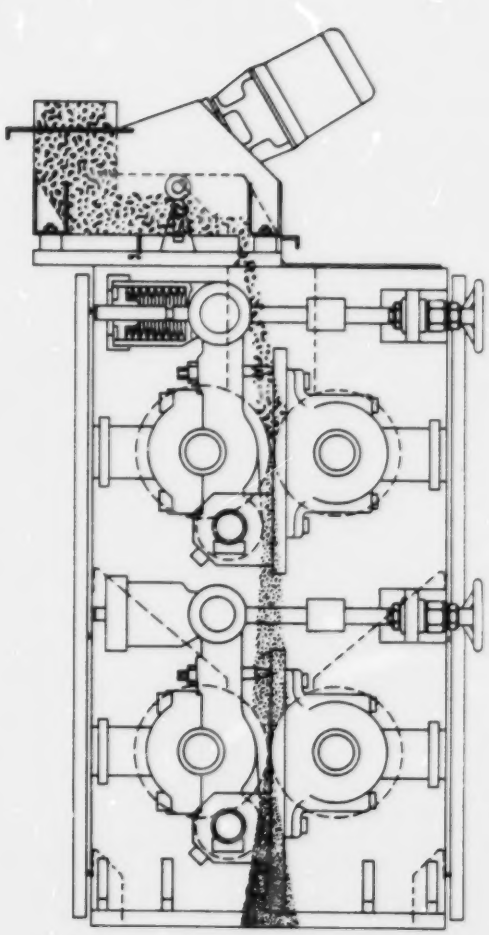


Fig. 21. Internal operation of a two-pair roller mill. Source: Gebr. Bauermeister and Co.

Fig. 22. Roll groove pattern for dicing. Source: Koppers Co., Inc.

2.20 *Roll speed* Rolls operating at the same speed grind by crushing the grain. A pair of rolls rotating at different speeds provide an additional shearing action. Changing the relative diameter of the drive sheaves alters speed differential of the rolls. Figs. 23–26 illustrate the effects of changing spacing and speed differen-

tial of the rolls. The data result from studies by Reece and Lott (1985) using a two-stage roller mill setup primarily for grinding corn, but also suitable for grain sorghum and wheat.

Fig. 23 shows how speed differential relates to capacity and to the spacing of the bottom roll for a two-pair roller mill. Grinding rate increases dramatically as the bottom-roll spacing increases. Grinding rate also increases as the speed differential for the top roll increases. Reducing the speed of the bottom rolls increases capacity.

Fig. 24 shows how changes in speed differential of the rolls affect particle size distribution and geometric mean diameter. Increasing speed differential caused a limited reduction in the amount of material smaller than 1200 µm. At the same time, it resulted in a limited increase in material larger than 1200 µm. Geometric mean diameter was increased from 1393 to 1583 µm.

As illustrated by Fig. 25, a large speed differential between the top rolls and between the top and bottom rolls produced the least amount of fines, or flouring. Very fine particles are generally undesirable for livestock feed.

Fig. 26 shows how increasing spacing between the bottom rolls increases the proportion of particles between 2380 and 3360 µm.

Increasing the rotational speed of the rollers increases the mill capacity at the expense of shortening the machine life and increasing the frequency of regrooving. Nonetheless, small-diameter rolls must be operated at high rotational speed since the surface velocity decreases as diameter decreases.

Operating speeds for roll diameters commonly used in Canada follow:

Roll diameter (mm)	Operating speed (m/min)
230	370
300	430
410	490
460	520
510	550
610	550

Rolls 610 mm in diameter operate at a lower rotational speed because they are not usually corrugated. The greater nip of larger rolls allows them to operate at higher speeds.

2.21 *Feeding* The feeding system for a roller mill must distribute material evenly across the rolls and prevent foreign material from entering the mill. Even distribution of material assures the mill achieves maximum capacity and uniform reduction. Because of the close tolerances between rollers, foreign material entering the mill is especially damaging.

Use either a slide gate or a feeder mechanism to control feed rate. Simplicity and low cost makes slide gates popular. However, slide gates do not guarantee constant feeding. Erratic feed rates can cause surge loads that

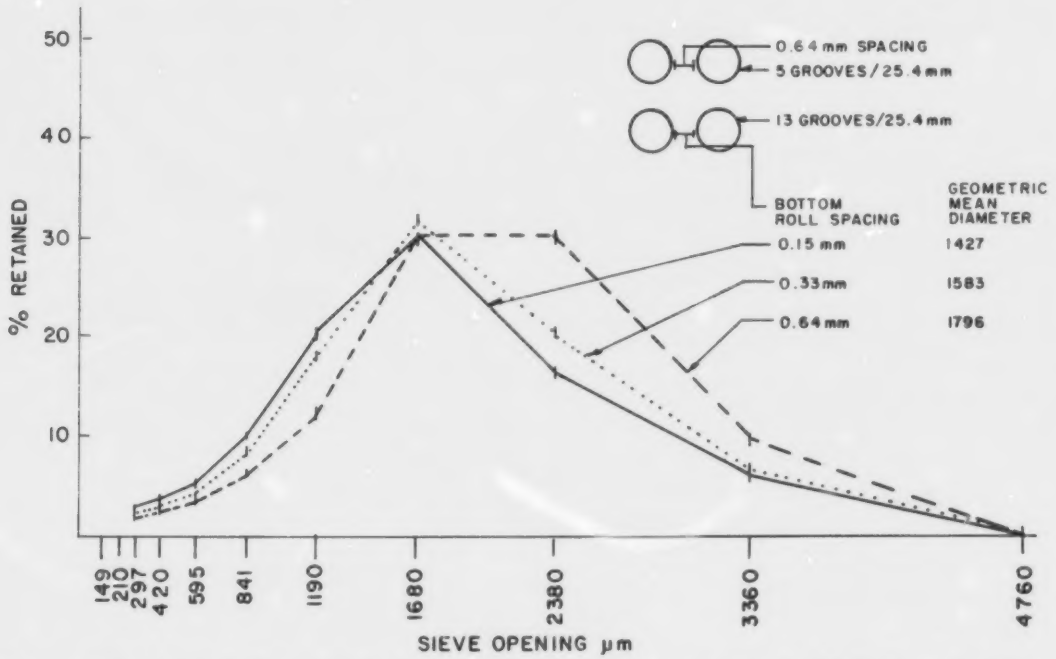


Fig. 23. Effect of bottom roll spacing and roll speed differential on corn grinding rate (Reece and Lott 1985).

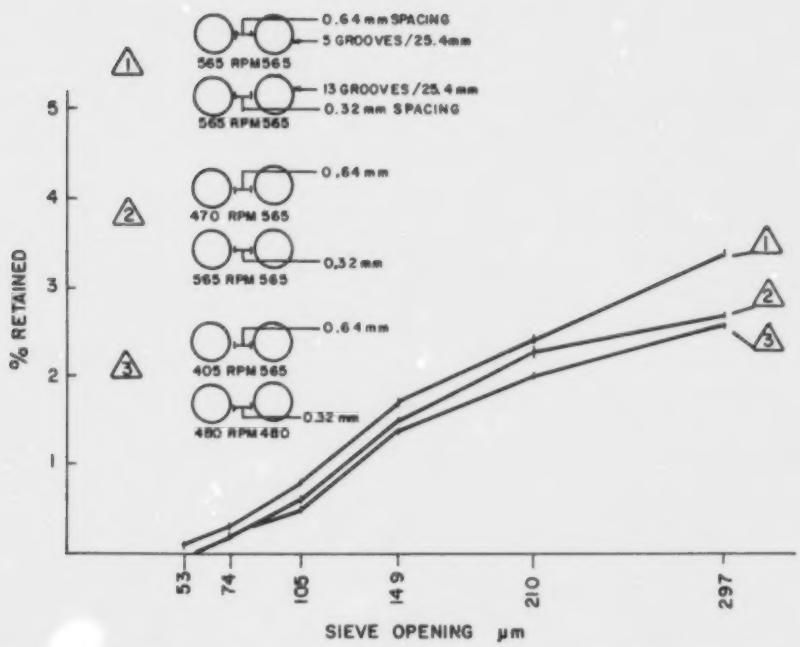


Fig. 24. Effect of roll speed differential on corn particle size distribution (Reece and Lott 1985).

plug the mill, or unnecessarily low feed rates that underutilize the mill.

A feeder mechanism, such as a rotary valve or screw feeder, allows the operator to set the feed rate for maximum capacity. A common feed distributor is the shaker type that uses an adjustable dam across a shaker shoe to spread the flow of material. An eccentric drive from one of the grinding rolls powers the distributor through a hand clutch. The two-pair machine shown in Fig. 21 has such a feed distribution device.

Fig. 27 shows a mechanism for feeding whole corn forage. In this case, a reel chopper extending the full length of the rolls performs both initial reduction and feeds the rolls. A screen determines particle size and prevents foreign materials from entering the mill.

Other common feed arrangements include a solid roll feeder regulated by a feed gate and a pin feeder useful for high-moisture material.

Roller mills are built to be quite robust. Hydraulic or spring-loaded rolls allow oversized material to pass; however, the shock of foreign materials entering the rolls can cause rollers to wear prematurely or cause shafts, bearings, and rolls to break. Keep foreign materials out of the mill.

Ideally, the first line of defence is to pass all grain coming into the mill through a scalper. The scalper protects all processing and conveying machinery from extraneous material.

Most manufacturers offer integrated single-screen shaker scalpers for dry rolling. These shakers both clean the incoming grain and act as feeders. Select a screen that allows the grain to pass through to the mill and directs the foreign material to waste. Also, provide an aspirator to help eliminate the increased dust generated by the scalper. The capacity of integrated scalpers is limited to 3–4 t/h. For greater capacity, install a separate cleaning machine.

An integrated scalper is not practical for steam rolling because of the presence of a conditioning chamber. Yet, steam rolling demands even more stringent cleaning to remove both foreign objects and dust. Fine dust combines with excess moisture from the steam chamber to form mud, which accumulates on the rolls and diminishes rolling quality. In this case, use a double-screen cleaner with aspiration to clean material before it enters the steam chamber.

As a second line of defence against foreign material, equip every roller mill with a magnet to capture tramp metal. Install spout magnets immediately upstream of the mill in a spot easily accessed for service. Additionally, install magnets in a grid in feed hoppers, in integrated scalpers, and in the feed distributor.

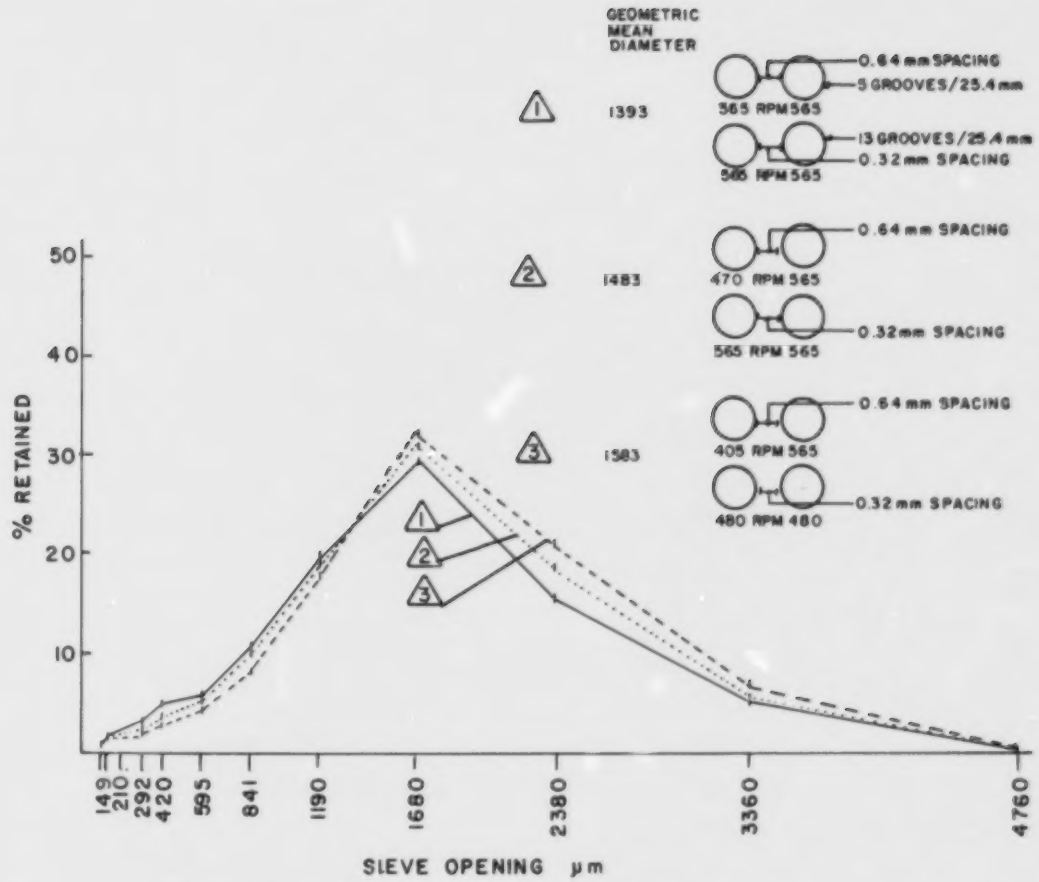


Fig. 25. Effect of roll speed differential on corn particles retained (Reece and Lott 1985).

When flaking steamed grain, the very high mill pressures used can cause bearing reactions up to 90 kN. Shock loads from stones are even more intense and potentially damaging. Hydraulic pressure rollers handle shock loads better than conventional springs; however, early failure and premature wear still occur at these high loadings.

On spring-loaded mills, use shear pins designed to shear and release the rolls when foreign objects pass through the mill. The broken pin is then easily replaced. On hydraulically loaded mills, use an accumulator to take the shock load out of the system. In this case, bearing retention cylinders unload and transmit the shock load.

2.22 *Dry rolling and crumbling* Dry rolling performs a cracking function; for corn, use rolls with 5 grooves per 25.4 mm, and for small grains, use rolls with 11–15 grooves per 25.4 mm. In general, use two-pair mills for dry rolling. Set the upper bank to crack corn and the lower bank for small grains. Corn can also be reduced to 1.6 mm in one pass in a double-reduction process.

Crumbling refers to the process of reducing pellets to 6.4 mm or smaller. Crumbling mixes feed of various sizes, primarily for poultry and swine feeding. Use roll diameters of 150 or 200 mm with lengths of 910 mm, 1220 mm, or 1520 mm. LePage grooves (Fig. 26) are normally used with 10 grooves per 25.4 mm on the saw-tooth roll and 8 grooves per 25.4 mm on the conventional roll. Because fines are undesirable, operate the rolls slowly (300–400 r/min) to maintain sharp grooves. For large reduction runs, a double-reduction mill produces fewer fines than a one-pair mill. A crumbling mill can also work well on corn and small grains.

2.23 *High-moisture rolling* Tempering refers to the process of adding moisture to grain before rolling. Water is metered onto a known amount of grain in a mixing conveyor or mixing box (Fig. 28) to bring the product to the desired moisture content. The wet grain is

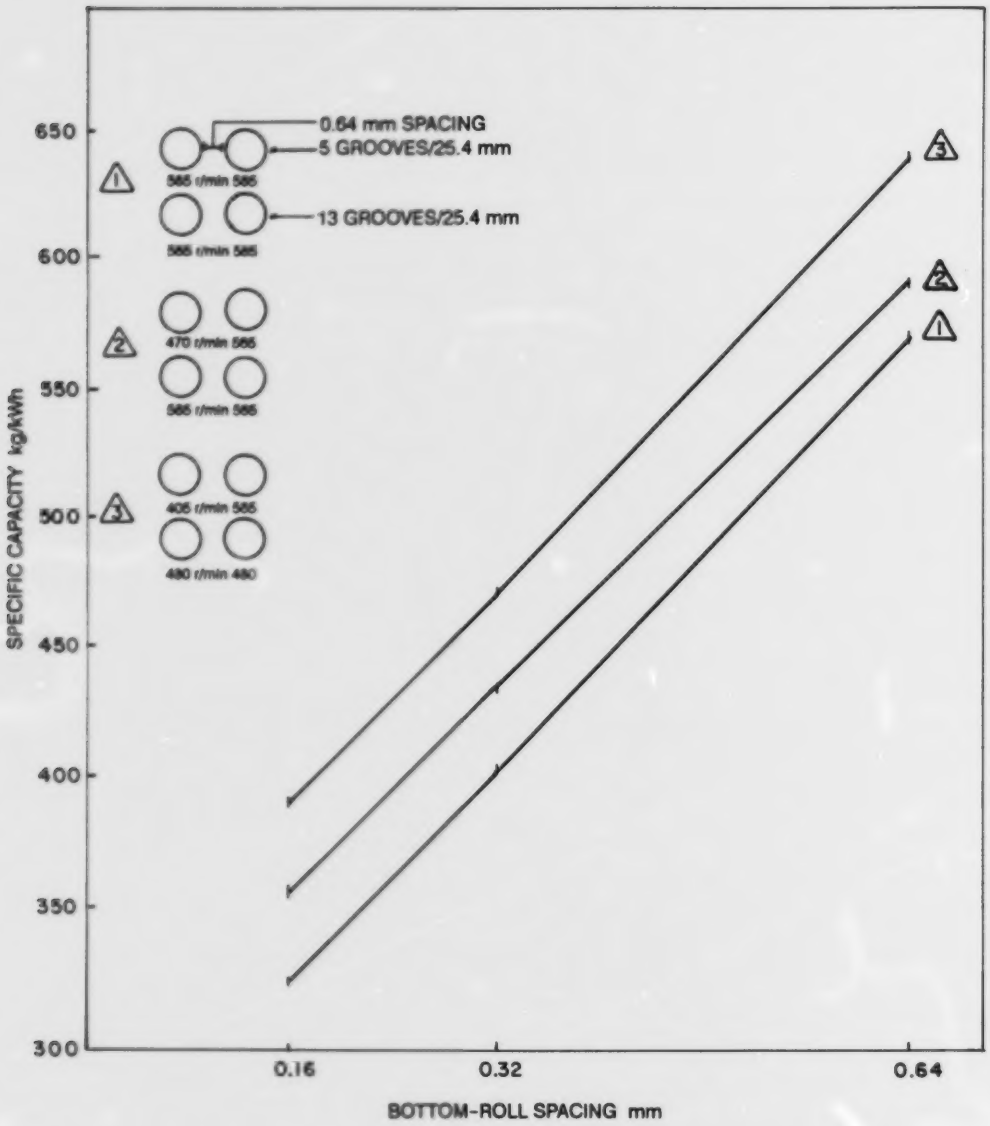


Fig. 28. Effect of bottom roll spacing on corn particle size distribution (Reece and Lott 1985).

then held in a tempering bin for 12–48 h until the water fully penetrates the kernels. Add hot water to speed the rate of absorption.

Tempered grain may attain a moisture content of 20–22% before rolling. Rolling produces a flaked feed that must be used quickly to avoid spoilage. The wetter the grain, the mushier it becomes. Moreover, a moisture content above 30% causes grain to stick to the rollers, even if the system includes scrapers.

Tempering is best used to raise the moisture content of overly dry grain before rolling. This action reduces both the energy required for rolling and the quantity of fines produced. As well, livestock find high-moisture grain more palatable and digest it more easily.

2.24 *Steam rolling* Steam rolling is the conditioning of grain with steam before rolling. A combination of steam rolling and flaking makes grain more palatable and more digestible and virtually eliminates dust. Increasing retention time in the steam chamber, increasing roll pressure, and decreasing roll spacing produces a flatter, or flakier, product.

Fig. 29 shows an industrial steam chamber mounted on a single-pair roller mill.

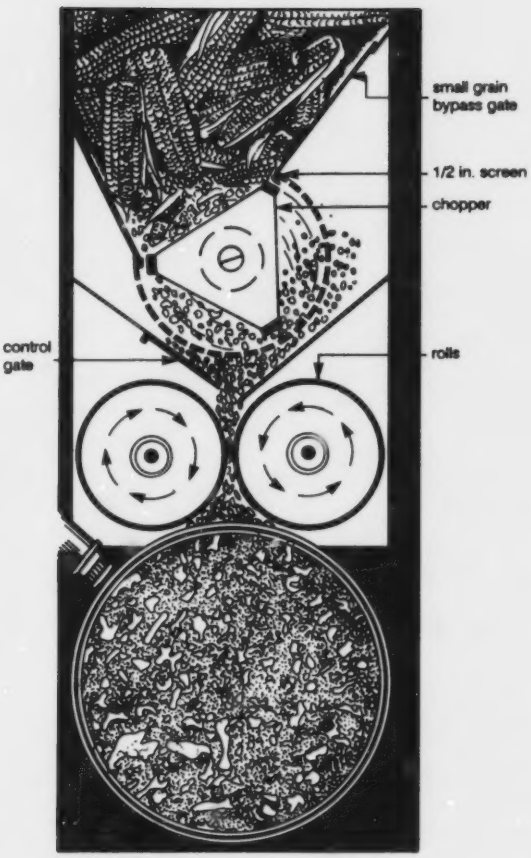


Fig. 27. Feed mechanism for whole corn.

Ensure that the steam supplied to a steam chest is without condensate. High-temperature steam, produced under high pressure, yields better distribution in the steam chamber and allows more uniform and faster absorption into the kernels. It also heats the grain before rolling.

Table 8 presents data useful for choosing an appropriate size of boiler for supplying adequate steam to a steam chamber. The figures are derived by calculating the amount of water required to increase moisture content the desired amount. For example, a steam rolling mill operating at 7.25 t/h theoretically requires 507 kg of steam to raise the moisture content 7%, or 70 kg/t. An allowance of 30–50% compensates for line losses and the escape of live steam from the steam chamber.

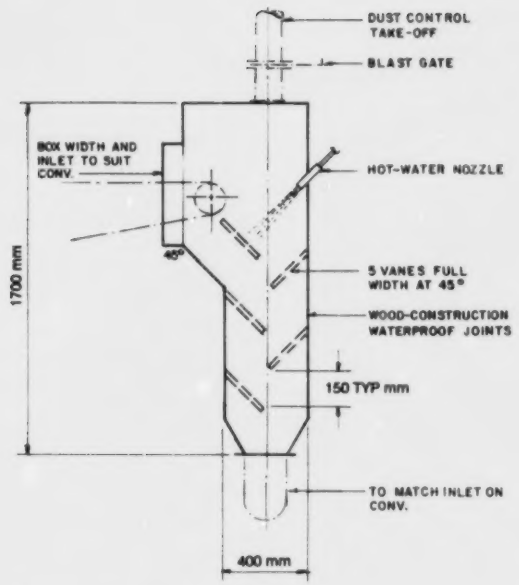


Fig. 28. Water-mixing chamber.

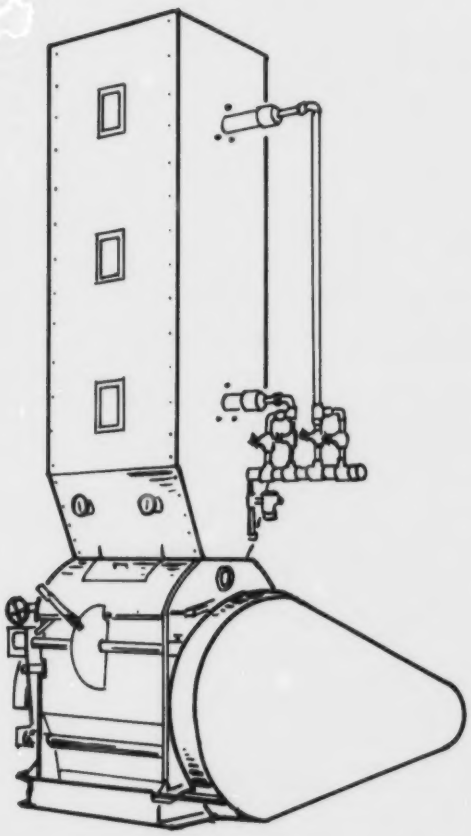


Fig. 29. Steam chest mounted on a one-pair roller mill. Source: Roskamp Manufacturing, Inc.

Table 8 Boiler requirements for steam rolling

Grain	Steam (kg/t)	Retention time in steam atmosphere (min)
Oats	75	6–10
Barley	100	6–10
Wheat	100	6–10
Corn	150	12–20
Sorghum	150	20–30

Source: Larson (1978).

Calculate the total steam (kg/h) required from the boiler:

$$\text{steam required (kg/t)} \times \text{mill capacity (t/h)} \times (1.3 \text{ to } 1.5)$$

Because steam generators frequently run longer than actually necessary, estimate an overrun of 20% and add it to the required boiler power.

Then, determine the boiler power (kW) by dividing by 21:

$$\frac{\text{total steam required (kg/h)} \times 1.2}{21}$$

The steam chamber must be an appropriate size. Determine the size by calculating the volume that yields the desired retention time. If the calculations specify chambers that are unrealistically tall, increase the cross-sectional area. Suppliers' literature lists popular cross-sectional areas.

Retention times differ for steam rolling and steam flaking. Steam rolling requires a retention time up to 10 min. The retention time for steam flaking is 15–25 min. Longer retention times produce flatter flakes. Oats and barley require 15–20 min in the steam chamber for flaking; corn and milo require 20–25 min.

Because steam rolling raises the temperature of milled material, cool and dry the feed to keep it from spoiling. Use an aeration bin to supplement an undersized cooler. Add heat to supplement the sensible heat of the material to reduce adequately the moisture content.

When specifying a steam rolling operation, include a condensate drain for the steam-supply header. Without a drain, steam condensate remains in the header and causes corrosion. As well, interlock an exhaust fan with the chamber to remove excess steam.

2.25 *Conveying and storing rolled material* The main problems associated with conveying and storing rolled products are breakage and reduction of temperature and moisture. The type of rolling determines the severity of these problems.

Moving dry, rolled product poses little difficulty. Most installations use gravity discharge into a mechanical conveyor such as a screw or bucket elevator. Material may be delivered to storage, to a mixer, or directly to loadout.

Use a cooler–dryer to control moisture and breakage in steam-rolled or high-moisture grain. Load the grain into the cooler–dryer using a gravity discharge system directly from the mill. Minimize breakage with a slow-speed bucket elevator for vertical conveying or a belt conveyor for horizontal transport.

A steam-rolling operation without a cooler–dryer requires several adjustments. Most importantly, to prevent spoilage the material has to be fed shortly after rolling. Storing warm and wet rolled material causes bridging in the bin and corrosion of the bin walls. Live-bottom bins and aeration fans reduce these problems, to some extent. However, in-bin aeration cannot reduce grain temperature sufficiently to eliminate the need for a cooler–dryer.

Using a pneumatic system to convey steam-rolled material removes excess steam from the mill. This result keeps the mill clean and improves the environment. Although temperature reductions of 11°C and moisture drops of 1% are typical with pneumatic conveying, the mill still requires a cooler–dryer. However, pneumatic conveying can cause product breakage in most grains and is particularly hard on corn and sorghum.

2.26 *Installation and maintenance* Sufficient space is required for removing the rolls when they need regrooving. This factor is the most critical requirement for a roller mill installation. Nevertheless, several other installation specifications are important.

Allow at least 600 mm on the side of the machine for inspection and maintenance. Install rubber or neoprene vibration isolators, similar to those used for hammer mills. Direct the feed to the centre of the feed roll or feeding mechanism; be careful not to angle it sideways. Provide a means to remove material from the mill at least as fast as it is produced. On hydraulically operated units, mount the pump reservoir and control panel independent of the mill.

Maintaining a roller mill is relatively simple. To keep it in good operating condition, periodically lubricate all moving parts and routinely check the condition of various machine parts. Do not allow dust to build up inside or outside of the machine. Inspect rolls

for wear and end-to-end adjustment. Check roll scrapers for wear and check fasteners for tightness. As well, maintain the tension of drive belts for maximum efficiency.

Before starting the motor, turn the rolls by hand to ensure that all moving parts operate freely. At the same time, remove stones from the hopper and tramp metal from the magnet.

2.27 Comparing hammer and roller mills

Compared with other mills, roller mills require less power for high capacities. Roller mills also produce feed that is more uniform, with little fine or dusty material. Unlike hammer mills, though, roller mills do not suit operations that process mixtures of grain of various sizes. Roller mills are also more susceptible to damage from foreign materials. They do not heat milled material as much as hammer mills do.

Hammer mills, on the other hand, generate more noise and require more maintenance than do roller mills.

Table 9 compares the grinding rate for hammer and roller mills. In the example, the hammer mill is a full-circle mill using four screen sizes and relying on gravity feed and discharge. The roller mill is a two-pair mill configured with three bottom roll spacings and one roll speed. Specific grinding rates for all three roll spacings exceeded those for the hammer mill with a 4.8-mm screen. And, even at the smallest roll spacing, the geometric mean diameter (GMD) with the roller mill far surpassed that of the hammer mill.

Table 9 Effect of roll spacing and screen size on grinding rate and geometric mean diameter

		Grinding rate (kg/kWh)	Geometric mean diameter (μm)
Roller mill roll spacing (mm)			
Top*	Bottom**		
0.635	0.160	391	1427
0.635	0.318	476	1583
0.635	0.635	644	1769
Hammer mill screen openings (mm)			
3.175		257	679
4.763		352	858
6.350		450	987
9.525		638	1287

* 5 grooves/25.4 mm, 405–565 r/min
** 13 grooves/25.4 mm, 485 r/min
Note: In this example, both mills are used to grind corn for broiler feed. Source: Reece and Lott (1985).

Roller mills are uniquely capable of flaking and crimping grain, using a high-moisture, high-temperature process. They produce highly digestible feed, which is less dusty than feed produced by other reduction methods.

On the other hand, fine grinding to flour-like particles is a very expensive process with roller mills; hammer mills accomplish this reduction best. Hammer mills are best at processing all grains, ear corn, hay, and roughage, whereas roller mills do not handle fibrous material well.

3 MIXING

3.1 Purpose

Mixing is carried out for three reasons:

- to make the proportions of the mix constant throughout a batch
- to increase feed intake by increasing the palatability of a ration
- to ensure no animal receives an overdose when ingredients, such as antibiotics, are added in very small amounts

Only a proper mix guarantees nutritionally balanced rations. As a general rule, the more complex the formula, the greater the need for adequate mixing. Proper mixing ensures that each portion an animal receives contains the same mix as the original batch. Hence every animal in the group receives the same feed formula. Some animals refuse to consume certain ingredients unless they are mixed with other, more palatable ones.

Knowledge of proper mixing strategies ensures a uniform mix. For example, poultry and swine have a low tolerance for ration imbalance. Consequently, operations mixing feed for these animals require more costly equipment than do operations distributing simple rations for beef cattle. Furthermore, feed for young stock must be mixed more accurately than feed for mature animals because young animals only consume small portions and they have a lower tolerance to variation in their diet.

The sequence for adding ingredients and the length of mixing time influence product segregation. Add major ingredients first and follow them with the minor ingredients. This approach also reduces the mixing time required to attain uniform distribution of ingredients. Individual mixers have optimum mixing times for various feed formulations: generally 2–6 min. Use assay testing of samples taken from the mixer at 1-min intervals to determine optimum mixing time for each ration. Mixing times above or below the optimum result in nonuniform mixing.

3.2 Theory

The coefficient of variation (C_v) measures the effectiveness of a mixer. The C_v reflects the extent to which a number of samples taken from a mix vary from the mean. Mathematically, a perfect mix would have a C_v of zero. Hence the lower the C_v, the more uniform the mix.

Use this equation to calculate the coefficient of variation:

$$C_v = (100\, s/\bar{x})$$

where C_v = percentage of the mean that is one standard deviation

s = standard deviation of the samples, based on the normal curve

$\bar{x}$ = mean value of all samples

The C_v is a statistical concept that describes the probability of a given percentage of samples falling within specified tolerance limits. The coefficient of variation is the percentage of the mean that is one standard deviation.

Minimizing the C_v of a feed mix increases the probability of animals getting their proper nutritional requirement at each feeding. In general a C_v of 5–10% would be quite acceptable for most livestock, barring most nutritional problems. For cattle, a C_v of 15–20% is satisfactory but a C_v of 30–50% can produce nutritional problems. For swine and poultry, livestock nutritionists consider a C_v of 11–12% satisfactory.

Some of the factors that affect mixing effectiveness are:

- bulk density
- size and shape of feed materials
- moisture content
- mixing time
- mixer loading and unloading procedures
- agitator design

3.3 *Bulk density* The bulk density (B) of common feed ingredients ranges from 200 to 600 kg/m^3. In general, feed rations with B greater than 380 kg/m^3 have lower C_v values than rations with B less than 380 kg/m^3. B greater than 380 kg/m^3 is typical for 100% grain rations. At the same time, grain–roughage rations typically demonstrate B less than 380 kg/m^3. Because of their wide range of bulk densities, grain–roughage rations generally do not mix as well as other rations. Fig. 30 shows the

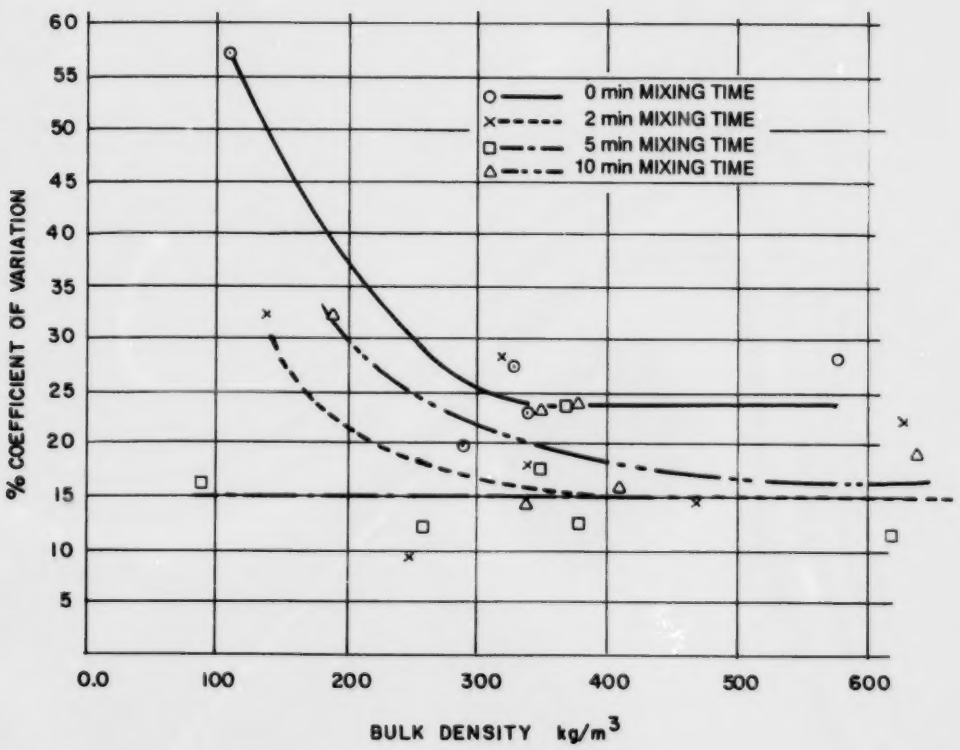


Fig. 30. Coefficient of variation vs. bulk density for a vertical batch mixer (Lenton 1975).

relationship between B and C_v for a vertical grinder–mixer.

3.4 *Size and shape of feed materials* The size and shape of feed materials vary widely and so contribute to the tendency of the material to segregate. The modulus of uniformity (U) describes the proportions of coarse, medium, and fine material in feed rations. For example, U for a well-graded feed sample would be 30% coarse, 40% medium, and 30% fine material (3:4:3). A ration containing 30–40% hay and straw typically has a U of 3:5:2. Table 10 compares the C_v with U for feed rations prepared with a vertical mixer. Feed containing higher proportions of coarse materials are less efficiently mixed than finer grinds and have higher C_v values. Coarse material such as straw allows dense, fine material to filter unevenly through the ration, causing uneven distribution of supplemental ingredients in feed rations.

3.5 *Moisture content* The effect on C_v is inconsistent when the moisture content of the feed ration falls within the normal range of 5–21%. Some particles tend to absorb liquids more than others, which changes density and friction characteristics and alters the performance of a mixer.

3.6 *Mixing time* The uniformity of the ingredients influences mixing time. As shown in Fig. 31, for a 100% grain ration mixed in a vertical mixer, the C_v drops quickly during the first few minutes of mixing and then tends to level out. These results indicate that 2–5 min represents the optimum mixing time for a grain ration. This mixing results in a C_v around 15%. Prolonged mixing adds little to ingredient uniformity and, in fact, may degrade particle-size distribution.

Table 10 Relationship between modulus of uniformity and mixing performance for a vertical batch mixer

	Modulus of uniformity	Coefficient of variability (%)
100% grain	1:5:4	17.5
	1:6:3	12.4
	0:6:4	11.4
Mixture of 60% grain and 40% hay	1:6:3	23.5
	2:5:3	16.0
	–	–

Note: Mixing time is 5 min.
Source: Lenton (1975).

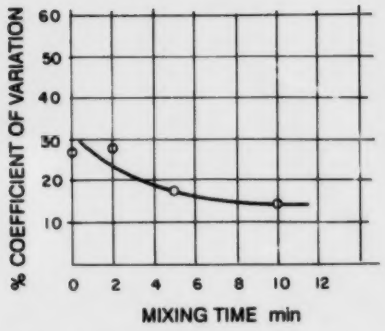


Fig. 31. Coefficient of variation vs. mixing time for a feed ration of 100% grain (Lenton 1975).

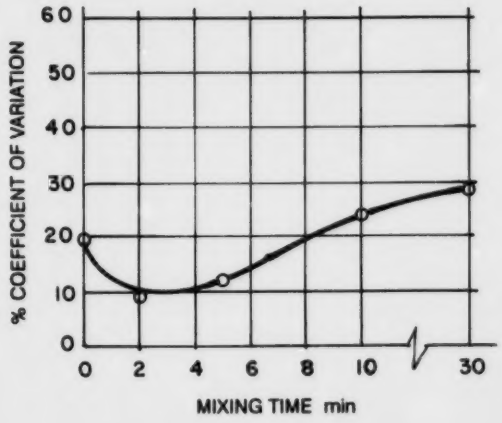


Fig. 32. Coefficient of variation vs. mixing time for a feed ration of 60% grain and 40% hay (Lenton 1975).

Fig. 32 illustrates another example. A ration of 60% grain and 40% hay combined in a vertical mixer–grinder showed C_v initially decreasing with time to a minimum value and then increasing again. In this case, optimum mixing time appears to be 2–5 min, resulting in a C_v about 20%. Mixing times longer than 10 min cause ingredients to segregate.

When mixing a grain–hay ration, take care to ensure that bridging does not occur on the mixing auger supports. If bridging happens, no mixing takes place and C_v values can exceed 25%.

Fig. 33 shows C_v plotted against time for a mixture containing 99.5% high-moisture corn silage and 0.5% salt. The ingredients were combined using a horizontal mixer. Increasing mixing time from 1 min to 10 min decreased C_v from 13.8% to 5.9%. Thus, the optimum mixing time is 5 min, achieving a C_v of 8%.

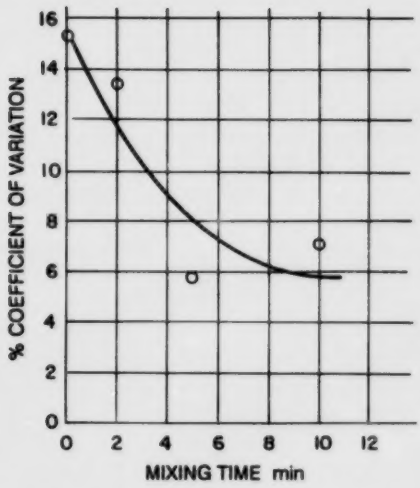


Fig. 33. Coefficient of variation vs. mixing time for a horizontal batch mixer (Lenton 1975).

3.7 *Loading and unloading mixers* To maintain consistently accurate mixing, keep the sequence of loading events constant from batch to batch. Load the major ingredients first and then add minor ingredients. This procedure reduces segregation so mixing time can often be shortened.

When unloading 100% grain ration from a vertical mixer, the uniformity of ingredients is maintained. However, with a ration of 60% grain and 40% hay, samples taken in the first 15 s of unloading may have mineral contents 2.5–6 times the average mineral content.

3.8 *Agitator design* The agitator design significantly affects mixing performance. Fig. 34 illustrates two agitator patterns: uniform flighting and expanded-bottom flighting. According to Lenton (1975), expanded-bottom-flighting designs mix batches containing high mineral concentrations better during the first 15 s of discharge than do agitators with uniform-flighting patterns.

3.9 *Types of mixers* Mixers are classified in this manual as batch or continuous flow. Three types of batch mixers are popular:

- horizontal
- vertical
- tumble

3.10 Horizontal batch mixers

Horizontal batch mixers consist of a trough-shaped container with a semicylindrical bottom, vertical sides, and an open top. One or more agitators join to the main shaft, which runs through the centre of the machine. Several designs for agitators are available. Ribbon and paddle types are most common.

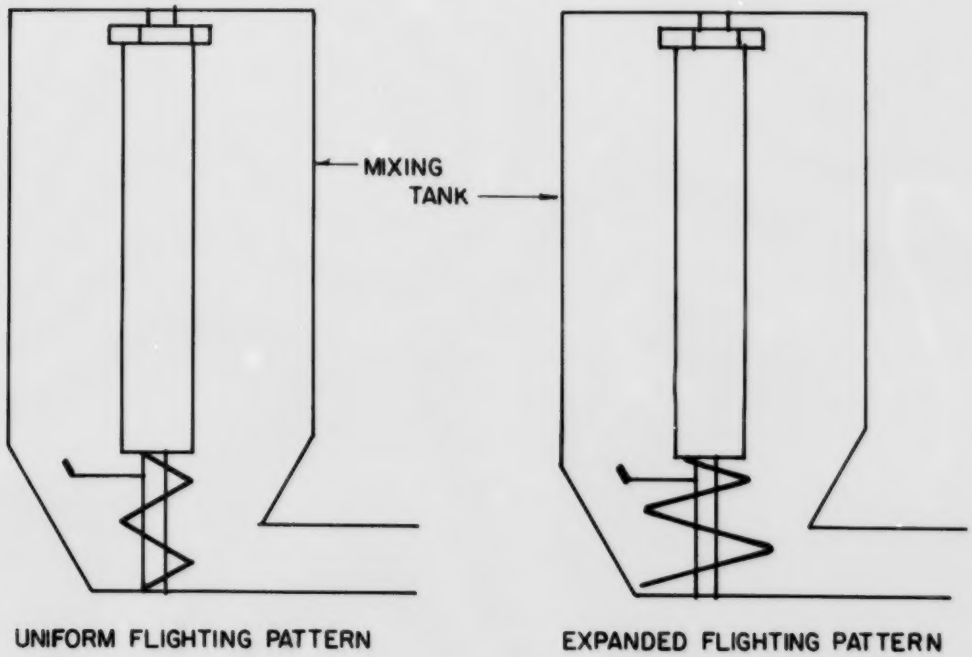


Fig. 34. Uniform and expanded flighting patterns for agitators in vertical batch mixers.

Virtually all mixers are made of steel. Sanitary mixers, constructed from stainless steel, are available for use with corrosive or highly abrasive products or for food applications. The ability of horizontal batch mixers to generate ration formulations with low C_v makes these mixers especially useful for a wide range of material.

In particular, use horizontal batch mixers for liquid feedstuffs and high-moisture rations. Discharge problems can arise when these materials are mixed in vertical mixers. Rations containing forage also mix better in horizontal batch mixers.

Horizontal batch mixers are most often used with a hopper scale. Mixing takes place in the hopper, while the next batch is formulated. The capacity of various horizontal batch mixers currently on the market ranges from 0.05 to 57 m^3.

3.11 *Ribbon agitators* Fig. 35 illustrates a horizontal batch mixer equipped with a double-ribbon agitator. During operation, the outer and inner ribbons move material in opposite directions, resulting in multiple mixing. The outer ribbon moves material toward the discharge; the inner ribbon moves it away. The small clearance between the ribbon and the bottom of the tub facilitates cleanout.

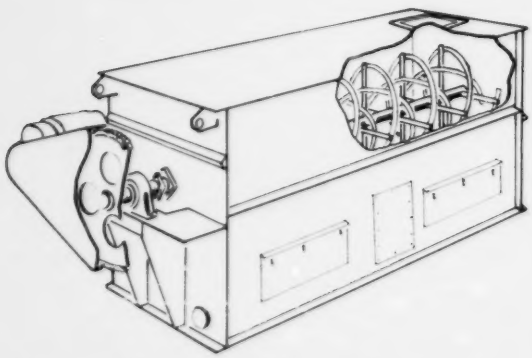


Fig. 35. Horizontal batch mixer with double-ribbon agitator. Source: Koppers Co., Inc.

Some mixers include outer ribbons equipped with wipers made of leather or synthetic material. These wipers aid cleanout and prevent cross contamination of batches. However, users report limited success with cleaning wipers because they wear quickly and require frequent replacement. One manufacturer offers an air-swept agitator with nozzles located on the agitator arms to clean the tank bottom, main shaft, agitator, and wall. This system requires air pressure of 350–700 kPa, depending on the size of the mixer.

Despite these auxiliary features, most feed mill operations do not require exotic cleaning equipment. Minimize the possibility of cross contamination simply by scheduling compatible feed mill production runs. When required, manual cleaning adequately serves the vast majority of agricultural applications.

3.12 *Paddle agitators* Paddle mixers use paddle- or plow-shaped agitators usually spaced in a spiral along the mixer shaft. Paddle blades scoop, lift, and tumble materials, recirculating them in a modified figure 8 pattern. Because of this mixing action, paddle mixers adapt well to fibrous and stringy material. As well, paddle mixers mix feeds with liquid additives more effectively than ribbon mixers. Fig. 36 shows a typical paddle mixer.

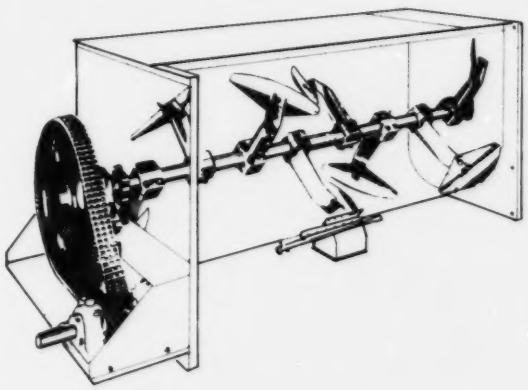


Fig. 36. Horizontal batch mixer with paddle blades. Source: Rapids Machinery Co.

3.13 *Installation* Installing a mixer often involves integration of loading, discharge, and conveying equipment within the confines of an existing structure. The limited headroom required by horizontal mixers makes them suitable in more locations than other types of systems.

Several configurations are possible:

- floor-mounted to discharge to a lower floor
- leg-mounted to discharge to a surge hopper or conveyor
- suspended from the ceiling

Discharge gates can be single or multiple. Indeed, the mixer can empty via complete bottom discharge to expedite unloading and cleanout. Bag dump hoppers and bucket elevators generally feed horizontal batch mixers. Alternatively, overhead scale hoppers and bins or floor-mounted augers deliver material to the mixer.

3.14 *Power requirements* Power requirements for horizontal batch mixers vary with three characteristics of the material:

- bulk density
- moisture content
- stickiness

In general, horizontal batch mixers use about twice as much power as vertical batch mixers of similar capacity. The additional power is required because the horizontal batch mixer accelerates more material at any given time.

Ribbon mixers require approximately 7–10 kW/t, whereas paddle types require about 12 kW/t for dry, free-flowing material. A wet mix is stickier and requires significantly more power because of the increased cohesion between particles.

Horizontal batch mixers operate at 20–50 r/min, depending on the diameter of the agitator. Manufacturers suggest 84–91 m/min as the ideal peripheral speed range. Adjust the speed of the agitator after installation to fine-tune the mixer performance.

3.15 Vertical batch mixers

Vertical batch mixers have a round hopper container with a screw running vertically through the centre. The mixing sequence involves collecting material at the bottom, transporting it vertically, and flinging it out the top. This sequence repeats many times during mixing until the material blends completely. The mixing period generally lasts about 5 min. Standard vertical batch mixers range from 1.4 to 7.8 m^3.

Fig. 37 shows some of the construction and operating details of a typical vertical batch mixer. To prevent segregation caused by material being flung against the mixer wall, install a deflector at the screw outlet. The deflector allows some material to pass while causing other material to drop closer to the centre. This arrangement enhances mix uniformity and reduces mixing time.

3.16 *Loading and unloading* Vertical batch mixers adapt well to various loading methods and locations. They can be loaded from the top via gravity or a pneumatic inlet. When pneumatic conveying equipment is used, locate the inlet tangentially to the mixer body to allow the mixer tank to act as a centrifugal receiver. As well, provide adequate venting. Fit vertical batch mixers between two floors; load it from the upper floor, and unload it from the lower floor.

Many vertical batch mixers can also be loaded from the bottom. In this case, mount a loading hopper on the floor with the cylindrical elevating section extending below floor level. Excavate beneath the floor to the appropriate depth. Fig. 38 illustrates a floor-loading mixer.

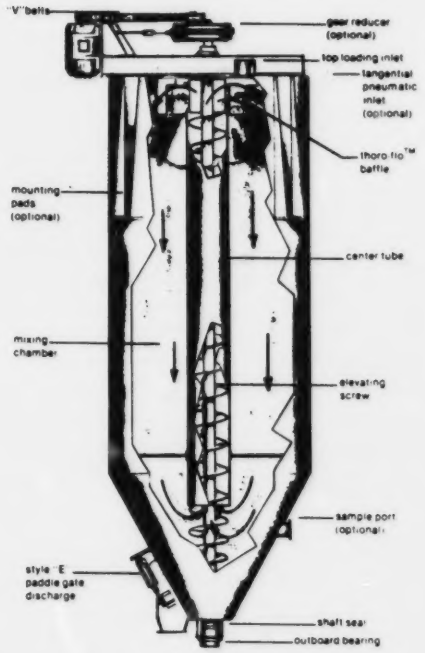


Fig. 37. Construction and operating details of a vertical batch mixer. Source: Koppers Co., Inc.

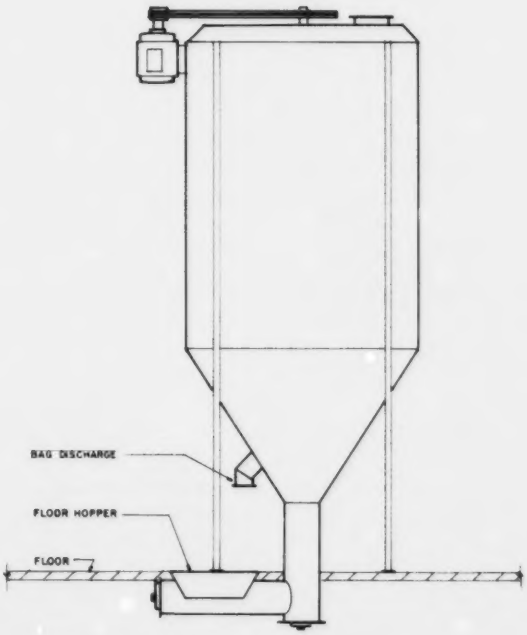


Fig. 38. Floor-loading vertical batch mixer.

Choose from various discharge styles for vertical batch mixers. Most discharge by gravity into a mechanical conveyor. Bagging directly off the mixer is also common. Yet, multiple discharge ports suit operations where flexible production is important.

3.17 *Power requirements* Vertical batch mixers require significantly less power than do horizontal batch mixers. In vertical batch mixers only a fraction of the material accelerates at any instant. For feed products, vertical batch mixers normally require 4.5 kW/t.

3.18 Comparing horizontal and vertical batch mixers

Consider these factors when choosing between horizontal and vertical batch mixers.

- Horizontal mixers initially cost more than do vertical mixers.
- Installing horizontal mixers requires more machinery because intake and discharge are at different elevations.
- Vertical mixers require minimal floor space; however, their headroom requirements are greater.
- Horizontal mixers demonstrate hourly production rates approximately 3 times those of vertical mixers, depending on the installation arrangement.
- Vertical mixers cannot handle liquids because of the flow problems created. Horizontal mixers can handle only nonsticky fluids.
- Cross contamination is a greater risk in vertical mixers than in horizontal ones because the units are not self-cleaning. Cleanout is better controlled in horizontal mixers because inspection is easier.
- The ability to repair or replace agitators varies with individual mixers, whether horizontal or vertical. Investigate this feature before selecting a mixer.

3.19 Tumble batch mixers

A tumble batch mixer consists of an enclosed vessel that mixes the material inside as it rotates. Common mixing vessels include revolving drums, which feature lifter plows on the interior surfaces, or surplus fuel drums mounted to rotate on a diagonal axis from corner to corner.

Tumble batch mixers most frequently handle fertilizer. Mixing times and power requirements are similar to those of horizontal batch mixers.

The mixer must be stopped to load and unload tumble batch mixers through an access hatch. This setup allows for complete cleanout. In contrast, production tumble mixers can often be loaded and discharged through a screw conveyor. This configuration, however, makes cleanout difficult.

Tumble batch mixers do not easily facilitate bagging. The addition of liquid into tumble mixers is not recommended.

3.20 Continuous-flow mixers

Continuous-flow mixers include:

- agitator types
- proportional-blending types

Use continuous-flow mixers to blend feeds and dry fertilizers where high-volume runs are common. Several ingredients can be continuously metered into a stream that enters the mixer. Typical metering devices include proportioning augers, rotary valves, or controlled orifices.

3.21 *Agitator mixers* Basically, agitator mixers are horizontal U-trough screw conveyors equipped with special flighting. Fig. 39 illustrates various flighting styles. Other, more sophisticated continuous-flow mixers have double-paddle agitators. Agitator mixers rely on automatic weighing equipment.

When selecting an agitator mixer, inspect these features:

- dust-tight covers that open easily
- bottom -drop doors to facilitate cleaning
- liquid applicator area

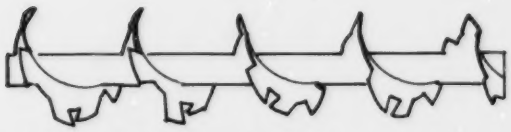
Fig. 40 shows a continuous-flow agitator mixer with these features.

Agitators commonly measure 1.8–6 m long with capacities of 650–900 kg/kWh, depending on the nature of the product, such as whether it is sticky or dry.

3.22 *Proportional-blending mixers* Use proportional-blending mixers when the various ingredients can simply be blended without undue regard for the uniformity of dispersion. Applications for proportional blending include:

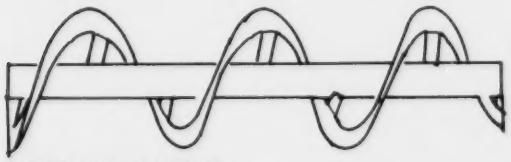
- blending high and low grades of grain to receive the highest possible selling price for the whole
- blending high- and low-moisture grain to save the cost of drying and to reduce the financial penalty incurred when marketing over-dried grain

CUT FLIGHTING
Moderate Agitation for Material in Transit



CUT and FOLDED FLIGHTING
Lift and Spill Material in Transit for Aeration and Mixing

CUT FLIGHTING with PADDLES
High Degree of Mixing and Aeration for Material in Transit



RIBBON FLIGHTING
For Sticky Material

Fig. 39. Flighting styles for agitator mixers.

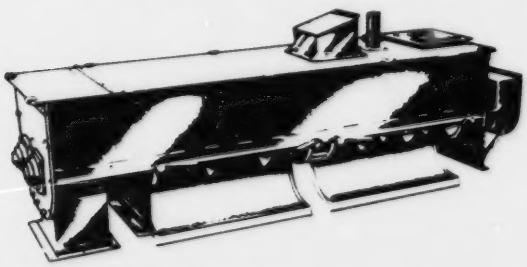


Fig. 40. Continuous-flow mixer. Source: Hayes and Stolz Industrial Manufacturing Co., Inc.

- blending inordinately clean grain with grain having an unacceptably high proportion of material other than grain

As these examples demonstrate, proportional blending best suits situations where sampling results are averaged over the entire load.

Proportional-blending takes place in two ways:

- by amalgamating known quantities of material in a storage or transport vehicle
- by continuously adding several ingredients to a common collection conveyor

Achieve the desired blend of materials in one of two ways. Control the flow rate for each material entering the mixer on a volumetric basis using variable-speed feeder screws or an adjustable feed gate. Alternatively, set the proportions of the materia's on a weight basis; use variable-speed belt conveyors with belt weighers controlling the belt speed to yield the preset product ratio. Fig. 41 shows a blending operation.

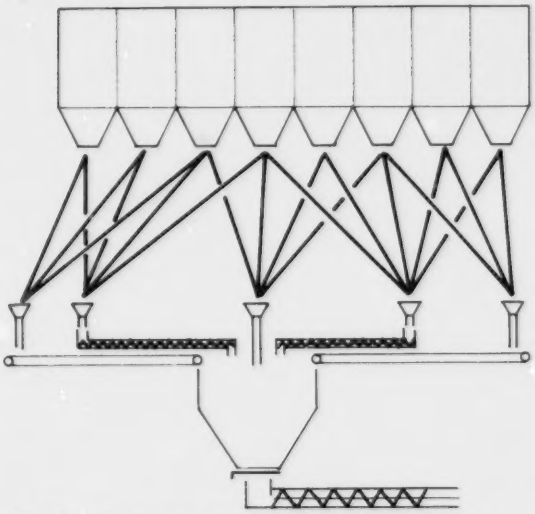


Fig. 41. Schematic view of a blending operation.

For practical purposes, conveying material at least 6 m through a conventional screw conveyor mixes the components adequately, through the action of the screw alone. If, however, the mix includes toxic ingredients such as urea, run the ration through a proper mixer to ensure uniform dispersion.

3.23 Mixer selection

Select a mixer based on its intended function. Choose a horizontal batch mixer for wet mashes, fats and oils, and wet roughage. Rely on a vertical batch mixer for dry grain rations because of its low cost and power requirements. As well, consider any physical constraints in terms of head and floor room and conveyor layout.

In selecting mixers for rations involving hormones, antibiotics, and other medications, ensure that the equipment can mix the

ingredients to specifications set by regulating agencies. Moreover, check that the equipment can be cleaned out completely to prevent contamination of other feeds. Makeshift equipment such as cement mixers and augers rarely meet these requirements and cannot provide uniform dispersion of ingredients.

To optimize efficiency, allow the mixer to discharge as fast as possible. Temporary surge hoppers located ahead of the conveyor offer much cheaper storage than does the mixer. Consider hoppers where high capacity is required.

Size the mixer according to the work routine preferred by the operator. Consider these factors:

- quantity of material to be mixed periodically
- number of different mixtures to be prepared
- future expansion anticipated
- availability of mixing time and frequency of mixing

For normal operations of loading, mixing, and unloading, the mixing rates for various sizes of mixers follow:

Mixer size (kg)	Batch cycle time (min)
250	9–10
500	14–20
1000	28–35

The values in this chart assume filling and emptying by conveyor.

Remember, use the size of mixer quoted by the manufacturer only as a guide. The actual capacity in cubic metres depends on the density of the material being mixed. As well, to prevent spillage during mixing, ensure that the gross volume of the mixer is 5–10% greater than the volume occupied by the ingredients.

Livestock rations vary in density from 200 to 600 kg/m^3. Cattle rations are normally at the low end of this range, especially when the ration includes straw or hay. Swine and poultry rations often measure about 450 kg/m^3.

3.24 Sample problem: mixed rations for cows and followers, hogs, and hens

Select a mixer to generate mixed rations to feed 27 cows and 10 followers (heifers and calves), 140 feeder hogs, and 2500 hens.

Determine the maximum weekly rations required for the animals.

27 cows, each at 7 kg/day	=	1323 kg/week
10 followers, each at 3.5 kg/day	=	245 kg/week
140 hogs, each at 3 kg/day	=	2940 kg/week
2500 hens, each at 0.1 kg/day	=	1750 kg/week
Total mixed feed	=	5068 kg/week

As one option, select a 500-kg mixer. Use it daily (except Sunday) for the hog ration and four times a week for cows and hens. At 20 min a batch, excluding preparation and clean-up time, the mixer operates 4 h and 40 min a week.

If the operator prefers to mix all the rations in a single morning, a 1000-kg mixer may be more convenient. The total equivalent mixing time, at 35 min per batch, would be 4 h and 5 min. This time represents a relative reduction in mixing time of 6%. The availability of storage space for finished product and desired freshness of feed are likely to be the deciding factors. Thus the size of the mixer depends more on individual circumstances important to the farmer than on capital cost.

3.25 Seed treating

Seed can be treated with chemical fungicides, insecticides, trace elements, and inoculants. Chemicals can be applied as solutions, powders, and slurries. Because treatment chemicals are normally applied at rates as low as 400 mL/m^3, mixing must be thorough to ensure satisfactory results. Commercial units with capacities of 90–460 m^3/h, as well as smaller batch units of 0.5–2 kg, are available for mixing and treatment functions.

Chemicals are usually sprayed onto the seed as it cascades down through a spray booth. The seed next passes through a coating chamber, essentially a mixing flighting, which tumbles the seed to coat it uniformly. Fig. 42 shows a simple seed treater and Fig. 43 shows the various types of flighting available.

Another approach to seed treatment is to apply the chemical to a high-speed revolving disk. The disk atomizes the chemical into a mist through which the seeds pass. Fig. 44 shows one arrangement for a mist treater. This method is particularly useful for treating irregularly shaped seeds. Seed and chemical are metered separately. In the illustration, seed flows over a dispersion cone and passes through the mist chamber where each seed receives a relatively equivalent dose of chemical. The seed then moves through a coating chamber to ensure thorough mixing.

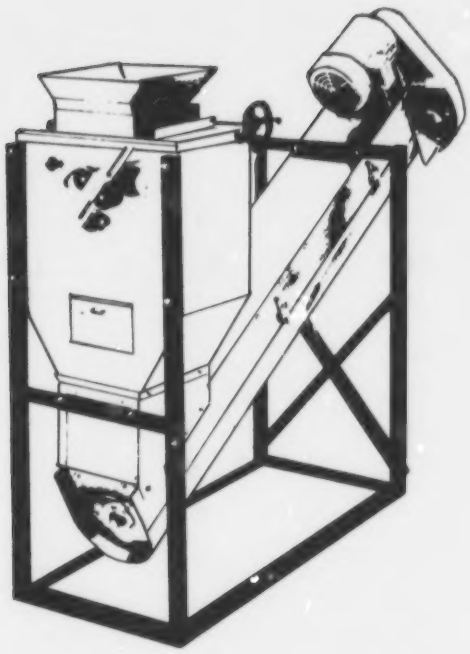


Fig. 42. Seed treater with mounted coating chamber. Source: Gustafson, Inc.

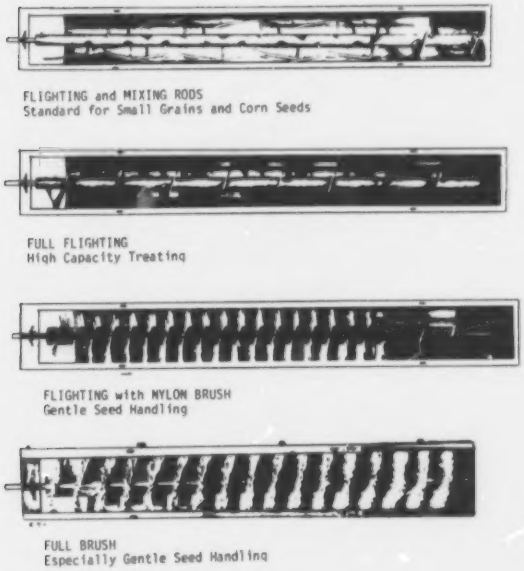


Fig. 43. Coating chamber flighting types. Source: Gustafson, Inc.

Fig. 45 shows a seed treater designed to apply powdered chemicals. In this case, a vibrating pan feeds chemical into the seed stream. The chemical is applied before the seed reaches the mixing chamber, starting the mixing process sooner than in other systems.

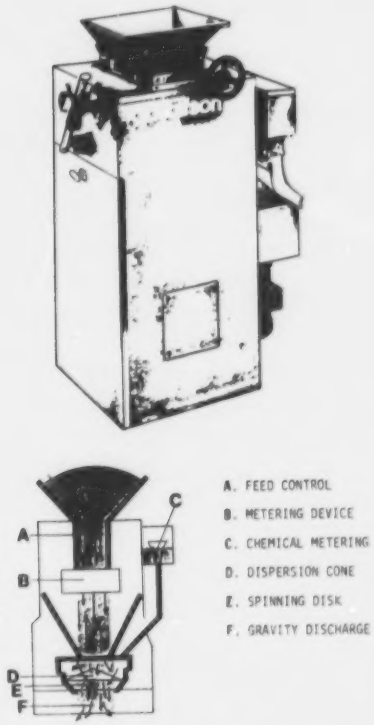


Fig. 44. Mist seed treater. Source: Gustafson, Inc.

Chemicals used in seed treatment are often quite toxic. Hence, take extreme precautions to protect people and livestock that may come in contact with the material. If possible, use all treated seed immediately after treatment. Treated seed requires special storage facilities. In addition, treated seed cannot be used for animal feed, may not meet germination standards if stored over a year, and is awkward to dispose of. Stored seed is also prone to contamination by pesticide residues from other seed and feed supplies. Preferably, treat seed only in amounts that can be used immediately.

Seed treatment is important in controlling seed-borne diseases. Seeds free from disease demonstrate an increase in percentage emergence and in seedling vigor. Table 11 lists typical yield enhancement data obtained from seed-treatment trials.

Table 11 Yield increase with seed treatment

Location	Crop	Yield increase (m^3/ha)
P.E.I.	spring barley	0.35
Sask.	spring barley	0.21–0.24
P.E.I.	winter wheat	0.26
Alta.	spring wheat	0.08–0.16

Source: Edgington, Kelly, and Reinbergs (1973).

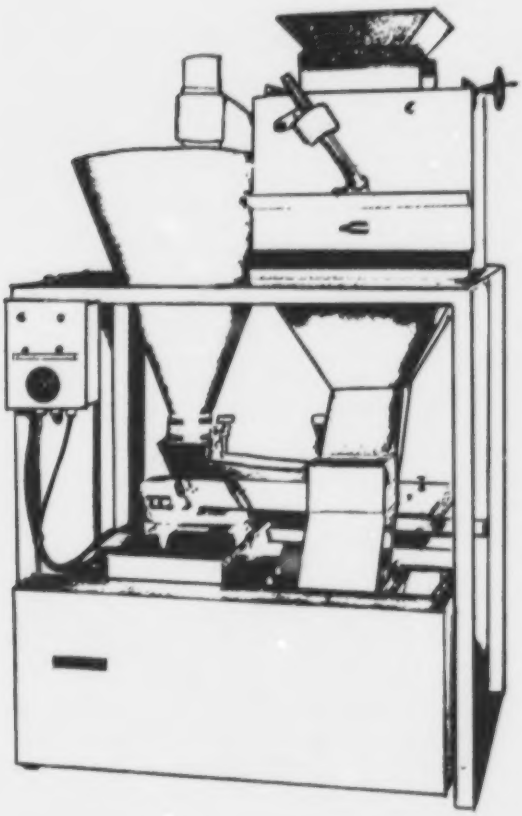


Fig. 45. Dust type seed treater. Source: Gustafson, Inc.

4 COMBINATION MILLS

Combination mills combine the operations of size reduction, mixing, and feeding into a single, multifunctional machine. Several manufacturers have assembled combination units that provide a variety of functions. These units may be either stationary or mobile.

4.1 Stationary mills

Stationary combination mills simplify ration formulation where raw ingredients are stored at a single location. Stationary mills include proportional grinder–mixers and packaged-pelleting plants.

4.2 *Proportional grinder–mixers* Proportional grinder–mixers consist of a hammer mill with four or more variable-speed feeder screws. The feeder screws simultaneously and continuously direct each ingredient into the hammer mill. Fig. 46 illustrates a common mill configuration. Overhead bins supply material to the proportioning screws, which feed the hammer mill. In the mill, material is ground and mixed. Finally, a discharge screw or a gravity discharge system unloads the product.

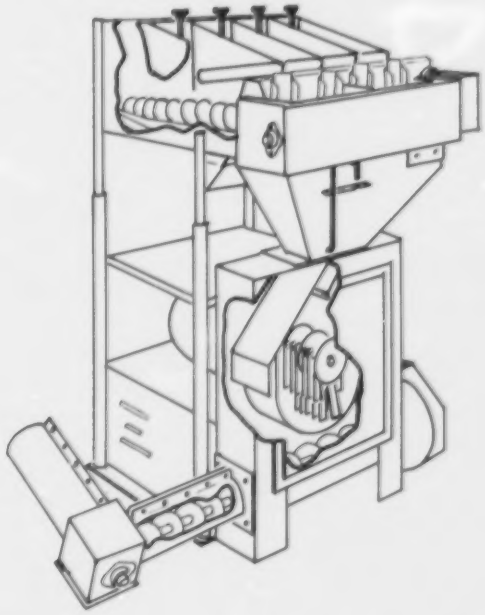


Fig. 46. Proportional grinder–mixer. Source: Clay Equipment Corp.

In an alternate configuration (Fig. 47), a roller mill grinds the material. It discharges into a mixing auger where supplements are metered in through vibratory feeders.

Successful use of a proportional grinder–mixer depends on properly calibrating the ingredient-metering device and frequently checking the system's adjustment. These mills meter ingredients volumetrically. Calibrate them by weighing the output from the separate metering channels. Repeat the procedure for various settings to generate a calibration table. Then adjust the machine to achieve the desired output indicated by the table.

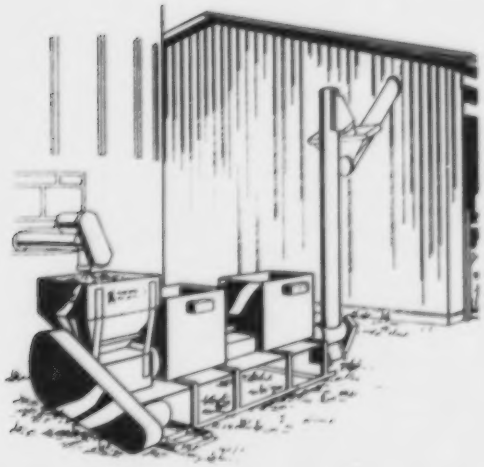


Fig. 47. Proportional grinder–mixer with roller mill. Source: Roskamp Manufacturing, Inc.

Note, however, that rations are formulated by weight but ingredients are metered by volume. Consequently, recalibrate the metering system if the bulk density of the ingredients changes. Rely on information from the equipment supplier for assistance in recalibrating the metering system.

Testing of proportional grinder–mixers on farms in Manitoba and Ontario revealed that 70% of prepared rations were unbalanced in calcium, phosphorus, and protein. The tests found improper mill calibration to be at fault. When properly calibrated, these mills produced rations with coefficients of variation of 11–12%, an acceptable value. See section 3.2 for more information on coefficients of variation.

The capacity of proportional grinder–mixers varies with the type of grain, moisture content, and grinding method. As a rough guide, units equipped with a hammer mill process around 600 kg/kWh of dry shelled corn through a 6.35-mm screen. Units equipped with a roller mill grind 600–2000 kg/kWh of dry shelled corn, depending on the size of the rollers and their groove pattern. Roller mills cannot, however, properly process more than one grain at a time, nor can they process roughage.

4.3 *Packaged-pelleting plants* Packaged-pelleting plants allow owners of small feed operations to produce pellets from individual formulas using local ingredients. The plants have all the components required to produce pellets, cool them, and discharge them by mechanical conveyor or load them into bags. These plants may include grinding units, but more often they require ingredients to be loaded already ground.

Fig. 48 shows a relatively simple plant setup. In this example, a grinder–mixer is used to prepare the ration, and mechanical conveyors supply and remove the product. Pellets

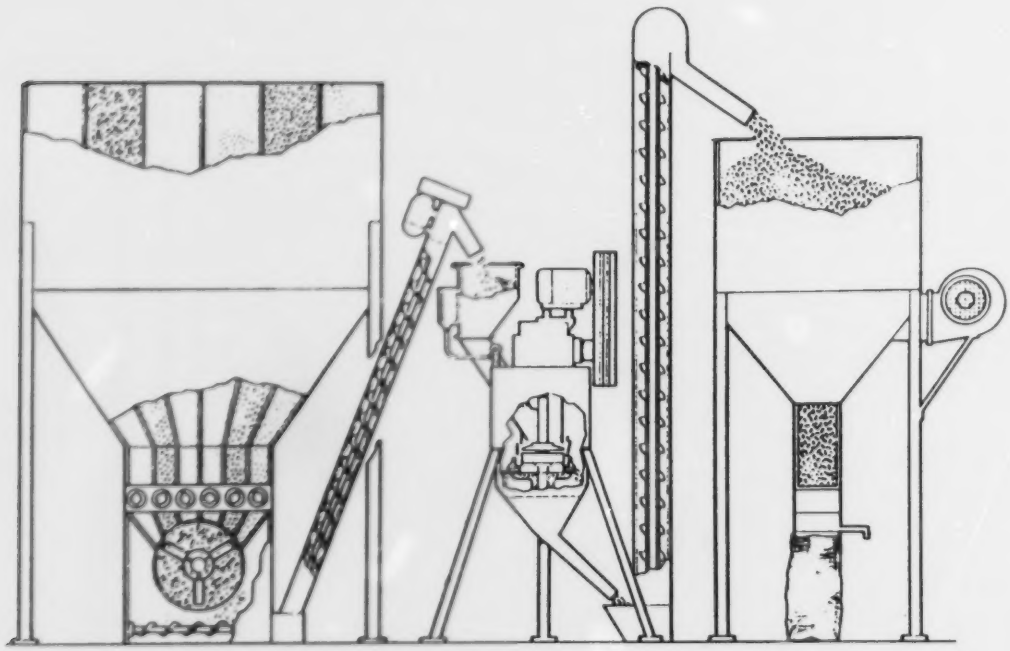


Fig. 48. Simple packaged-pellet plant. Source: Farm Choring Ltd.

discharge into an aerated bin for cooling; loadout is by bag. Water can be added with this system, but no provision is made for steam injection or reclamation of fines. Motors for pelleting plants of this type must provide 7.5–18.5 kW and produce around 40 kg/h with a 3.2-mm screen.

More sophisticated pelleting plants consist of large pelleting mills equipped with steam-injection units and positive-displacement feed intake (Fig. 49). Pneumatic conveyors move pellets produced by this type of plant into a collecting cyclone and then feed them into a cooler. After passing through the cooler, pellets can be left intact or crumbled, before going over a screen where coarse or fine particles are removed. Crumbles or pellets are discharged from the screen to a surge bin for bagging. The system redirects fines into the mash bin ahead of the pelleter.

With a 22-kW pellet mill and water injection, a capacity of about 900 kg/h can be achieved. Steam injection increases capacity to 1300–2300 kg/h.

With pelleting plants of this type, ingredients must be prepared before loading into the mash feed hopper. These plants produce higher-quality pellets at higher capacities than simpler models, mainly because they use more expensive pellet mills that are more versatile.

4.4 Mobile mills

Mobile mills suit applications where raw material is stored in various locations or where the feed must be distributed over a fairly large area or distance. Mobile mills include grinder–mixers, roller–mixers, and mixer–feeders.

4.5 *Grinder–mixers* Mobile grinder–mixers are versatile. They transport, grind, mix, and deliver feed in a single unit. These machines are designed to process grain, silage, and hay. The versatility of mobile grinder–mixers makes them useful as the initial processing system on small livestock operations.

Basically, a mobile grinder–mixer integrates a hammer mill and a vertical mixer on a trailer (Fig. 50). The system may also include scales, which are accurate only for measuring the major ingredients, such as grains. Supplementary feeds are added manually to the mixer through a separate hopper.

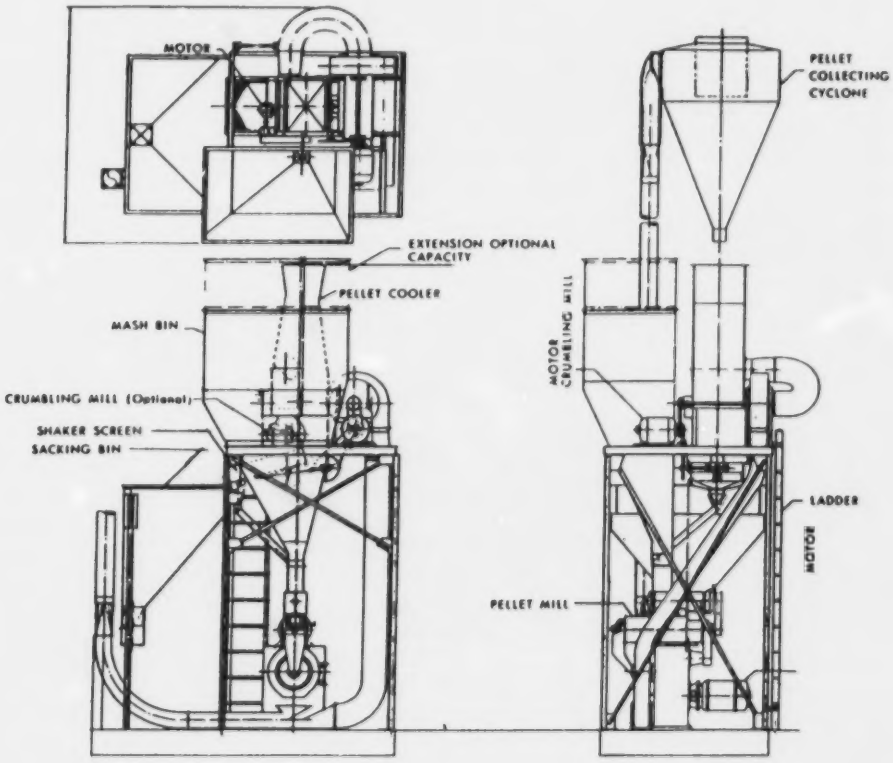


Fig. 49. Sophisticated packaged-pellet plant. Source: CPM Co.

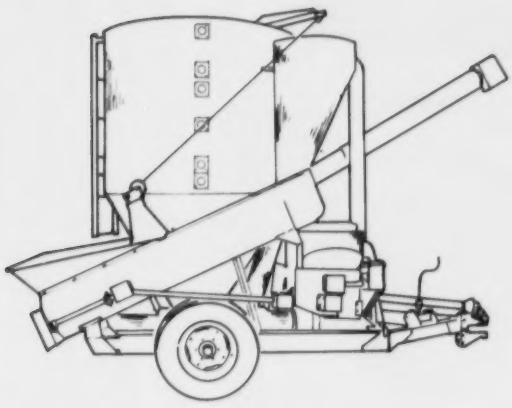


Fig. 50. Mobile mixer-grinder. Source: New Holland Division, Sperry Rand Corp.

High labor requirements, high operating costs, and restricted capacity limit the usefulness of mobile grinder-mixers. Farm tests conducted in Manitoba suggest the following procedure:

- Add supplements after at least 5% of the mixer volume is filled with grain.
- After all ingredients are added, run the mixer for 5 min. When grain and hay are being mixed, they begin to separate after 10 min.
- If any potentially harmful ingredients such as urea are included in the ration, discard the first 15 s of discharge.

Mobile grinder-mixers are powered by power takeoff (PTO). To drive a single grinder-mixer requires a tractor motor of 45–75 kW. Typical mixer tank capacities range from 2 to 3 t. Although grinding rates can reach 6–9 t/h, feed-preparation rates, including time for collecting ingredients, grinding, mixing, and feed delivery, measure 2–3 t/h.

4.6 *Roller-mixers* Mobile roller-mixers resemble mobile grinder-mixers. The roller-mixer is used in a roller mill, whereas the grinder-mixer is used in a hammer mill.

The size of the mixer governs the capacity of mobile roller-mixers. Hence, power requirements and capacities are similar for both grinder and roller mills.

4.7 *Mixer-feeders* Mobile mixer-feeders are typically horizontal mixers equipped with an unloading device designed to discharge into a feed bunk or a self-feeder. Various models come mounted on either trucks or trailers. Agitator elements are usually augers, although reel agitators are also available. Most mobile mixer-feeders are designed to handle small grains, shelled corn, and ground feed. Some models are available with conveyors large enough to handle silage and other roughage.

Generally, mobile mixer-feeders load from the top and discharge through a side-mounted chute, an elevator auger, or a chain conveyor. Electronic weighing systems may also equip these systems to gage the quantity of ingredients during loading and the discharge rate during feeding.

Fig. 51 shows a cross section of a mobile mixer-feeder with three auger agitators and a side chute discharge. Fig. 52 shows a unit with an auger elevator discharge mounted on a trailer.

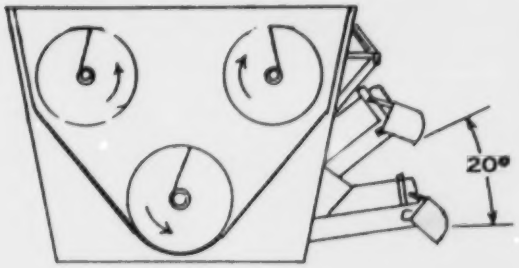


Fig. 51. Cross section of a mobile mixer-feeder. Source: Henke Machine, Inc.

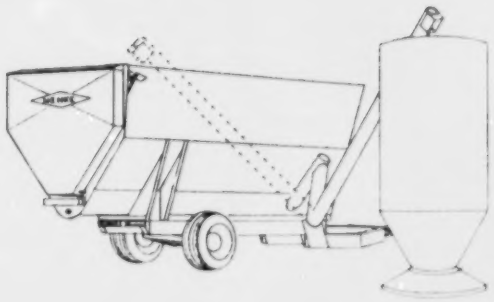


Fig. 52. Trailer mixer-feeder. Source: Henke Machine, Inc.

Capacities of mobile mixer-feeders range from 4.8 to 12 m^3. Power requirements depend on the type of ration, but as a rule haylage and molasses require more power than dry grains. Tractor or truck PTOs drive the units. Alternatively, smaller models come equipped with motors capable of generating 7.5–15 kW. Motors generating 30–37.5 kW may equip some large units.

Horizontal mixers better suit mobile applications than do vertical mixers. Horizontal mixers are more versatile and their centre of gravity is lower.

4.8 Hay grinders

Grinding to improve feed conversion of hay and straw and to decrease waste is becoming more common on Canadian farms. Ground hay is normally fed at the same time as the grain ration, either combined with it or as a separate offering.

The two machines most often used to grind hay are:

- small bale grinders
- tub grinders

4.9 *Small bale grinders* Small bale grinders shred solid bales of hay or straw through a hammer mill or a set of rotating knives. A screen behind the grinding area controls particle size. These machines are available with capacities of 5.5–18 t/h through a 25 mm screen. They have high power requirements because of the high fiber content of the material being ground and the shock of loading as each bale is forced into the grinding area. Small bale grinders require tractors with PTO power of 20–120 kW. Actual power requirements fluctuate with hay type, moisture content, size of the unit, and feed rate.

4.10 *Tub grinders* Tub grinders are portable PTO-driven hammer mills that are integrated into the floor of a rotary feed tub. They grind loose or baled straw and hay.

Tub grinders are designed to be batch fed with a front-end loader. As the tub rotates it regulates feed to the hammer mill. The size of the screen located below the hammer mill determines the fineness of grind. Ground material falls through the screen onto a screw or apron conveyor. The conveyor delivers the material to a slatted belt conveyor. Fig. 53 shows a typical tub grinder.

The grinding rate and power requirements for tub grinders depends on:

- the type of hay being ground
- whether the hay is baled or loose
- the hay moisture content and temperature
- the screen size used
- the available tractor power

Grinding capacity increases at low temperatures because hay becomes more brittle. High moisture content seriously reduces grinding capacity.

Tub grinders are rather inefficient, requiring high power inputs to produce modest throughput. Screen size is the most important operating factor directly influencing grinding rate, power consumption, and specific capacity.

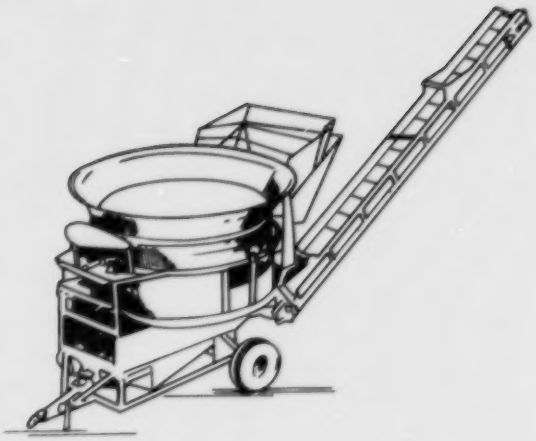


Fig. 53. Tub grinder. Source: Haybuster Manufacturing, Inc.

Reducing screen size by a factor of two generally doubles power consumption and halves grinding rate and specific capacity.

Tub grinders normally feed from a loader that dumps bales of hay into the tub. The heavy shock this imposes on the power train causes wide power fluctuations. Tests conducted by the Prairie Agricultural Machinery Institute (PAMI) indicated that available PTO power must be 50–90% higher than the average power input to prevent the tractor from stalling. Most tub grinders are equipped with tub governors to adjust the grinding rate so smaller tractors can be used.

PAMI tested five tub grinders sold in Canada between 1976 and 1977. Table 12 presents the institute's findings.

Table 12 Performance of a tub grinder with a 51-mm screen

Product	Grinding rate (t/h)	Average PTO power (kW)	Specific capacity (t/kWh)
Baled alfalfa	4.2–13.0	9.0–52.0	
Stacked alfalfa	3.4–16.0	13.0–54.0	0.16–0.37
Stacked barley straw	3.7–10.0	24.0–53.0	
Baled barley straw	2.8–18.6	33.0–100.0	0.08–0.20

Source: Prairie Agricultural Machinery Institute Evaluation Reports E0475A, E0475B, E0475C, E0475D, and E0475F.

REFERENCES

Batch and continuous-paddle-blade mixers for the processing industries. 1980. Marion, Iowa: Rapids Machinery Company. Catalog No. 180.

California master model pellet plant. San Francisco, Calif.: California Pellet Mill Co. Form 5641-R.

Clay meter/mill. Cedar Falls, Iowa: Clay Equipment Corp. Bulletin MM-307.

Edgington, L.V.; Kelly, C.B.; Reinbergs, E. 1973. *Availability of cereal seed treatment in Ontario.* Ontario Ministry of Agriculture and Food. Agdex 110/23.

Ensminger, M.E.; Olentine, C.G. 1978. *Feeds and Nutrition.* Clovis, Calif.: Ensminger Publishing Company.

Larson, F.D. 1978*a*. *Reduction hammer mill.* International Feed Milling, Production, and Grain Processing Seminar. Winnipeg, Man.: Underwood McLellan Ltd.

Larson, F.D. 1978*b*. *Reduction roller mill.* International Feed Milling, Production, and Grain Processing Seminar. Winnipeg, Man.: Underwood McLellan Ltd.

Larson, F.D. 1978*c*. *Mixing fundamentals.* International Feed Milling, Production, and Grain Processing Seminar. Winnipeg, Man.: Underwood McLellan Ltd.

Lenton, K.G. 1975. *Evaluation of mixing performance of on-farm feed-mixers.* Canadian Society of Agricultural Engineers. Paper No. 75-109.

Lewis, J.E. 1978. *Roller mills in grain processing.* Ottawa, Ont.: Canadian Feed Industry Association.

Lister farm feed pelleters. Edmonton, Alta.: Farm Choring Limited.

Naylor, J.L.; Smith, R. 1981. *Roller mills vs. hammer mills on corn.* American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 81-3028.

Naylor, J.L.; Smith, R. 1981. *Roller mills (current state of the industry).* American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 81-3027.

Nyborg, E.O. 1978. *Sperry New Holland model 379 tub grinder.* Prairie Agricultural Machinery Institute. Report No. E0475A.

Nyborg, E.O. 1978. *Farmhand model F890-A tub grinder.* Prairie Agricultural Machinery Institute. Report No. E0475B.

Nyborg, E.O. 1978. *Haybuster model C-9 tub grinder.* Prairie Agricultural Machinery Institute Evaluation. Report No. E0475C.

Nyborg, E.O. 1978. *Bearcat Tub-Master feed grinder model 4200.* Prairie Agricultural Machinery Institute. Report No. E0475D.

Nyborg, E.O. 1978. *Haybuster model H-1000 tub grinder.* Prairie Agricultural Machinery Institute. Report No. E0475F.

Operation and instruction manual for Bliss eliminator hammer mills, model E-1912-TF. Newkirk, Okla.: Bliss Industries.

Prew, S.R. 1981. *Increasing hammermill efficiency: a need in an era of rising power costs.* Pointers for profits reprint SR-1. Muncy, Penn.: Koppers Engineered Products.

Protz, A. 1976. *Farm feed processing and handling.* Ottawa, Ont.: Agric. Can. Publ. 1572.

Reece, F.N.; Lott, B.D. 1985. *Roller mills found competitive in broiler feed production.* Feedstuffs November 25, 1985.

Roskamp feed processing centers. Cedar Falls, Iowa: Roskamp Manufacturing, Inc. RFPC-80-CP.

Roskamp 12 × 30 roller mill operation manual. Waterloo, Iowa: Roskamp Manufacturing, Inc.

Roskamp pork producer. Cedar Falls, Iowa: Roskamp Manufacturing, Inc.

Summerfield, A.J. 1984. *Feed preparation on the farm.* Agricultural Engineer, Winter 1984.

Tailor-made crushing. Hamburg, West Germany: Gebr. Bauermeister and Co.

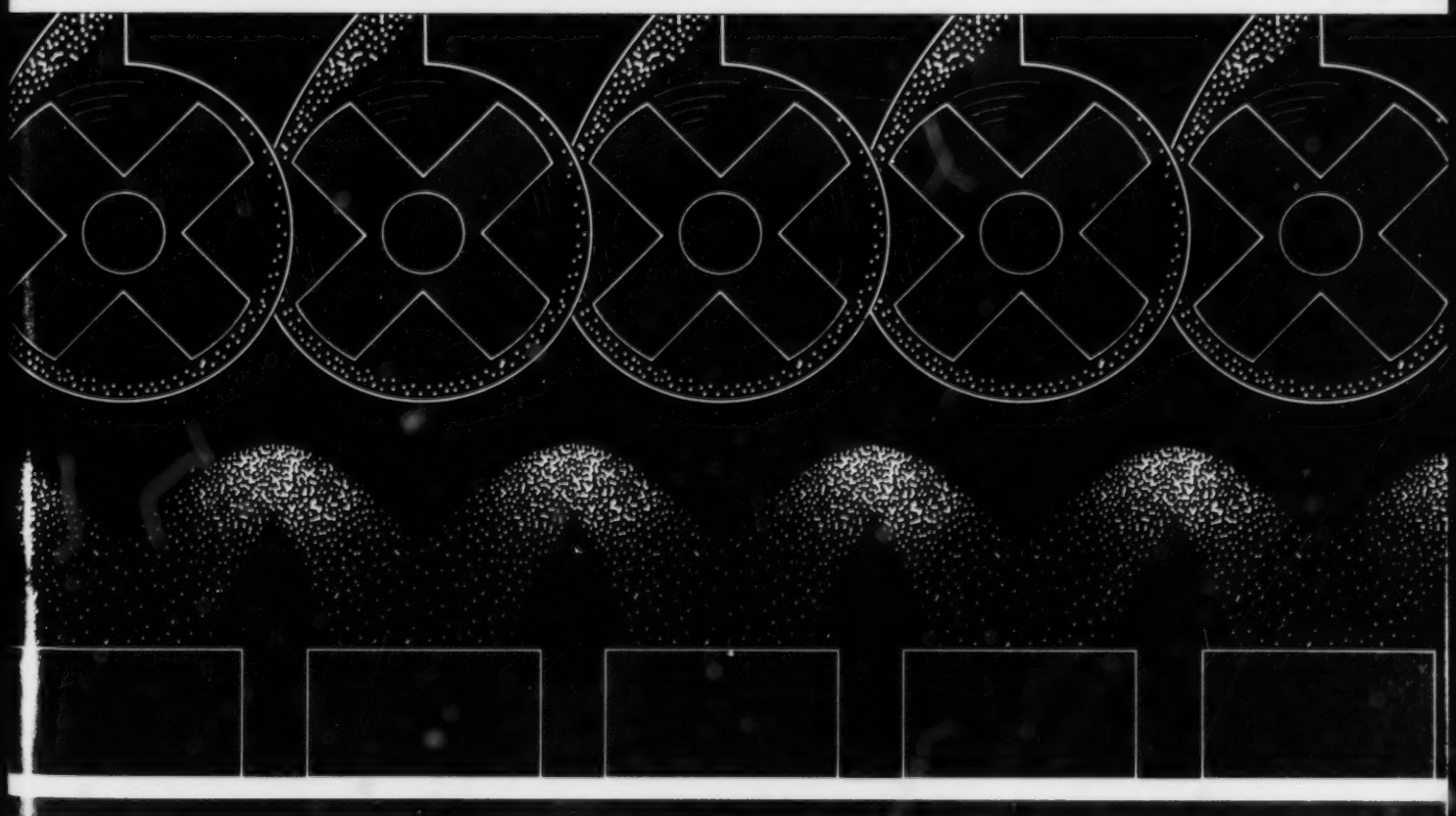
Thomas, G.F. 1958. *Basic facts in focus of grinding, mixing conveying with air.* The Feed Bag 4:88–90.

Weeden, J.K.; Norrish, J.G. 1981. *Stationary blender/grinders—A field evaluation.* Canadian Society of Agricultural Engineers. Paper No. 81-101.

Agriculture Canada

Manutention de produits agricoles

Appareils de trituration et de mélange



Canada

Manutention de produits agricoles

Appareils de trituration et de mélange

Direction générale de la recherche
Agriculture Canada

Publication 1843/F
1990

©Ministre d'Approvisionnements et Services Canada, 1990
Nº de cat. A15-1843/1990F
ISBN 0-660-92939-2
Imprimé en 1990

En vente au Canada par l'entremise
de nos agents libraires agréés et
autres libraires, ou par la poste au :

Centre d'édition du gouvernement du Canada
Approvisionnements et Services Canada
Ottawa (Ont.) Canada K1A 0S9

Prix sujet à changement sans préavis.

Publié antérieurement sous le titre :
Canadian Agricultural Materials Handling Manual
3.2. Size Reduction and Mixing
Agriculture Canada, publ. 5002.

Données de catalogage pour le Canada

Manutention de produits agricoles. Appareils
de trituration et de mélange / [rédaction-éd.,
Normand Rousseau ; contrat, Rhonda Birenbaum ;
conseiller scientifique, L. Heslop]. -

(Publication ; 1843)

Publié aussi en anglais sous le titre : Handling
agricultural materials. Size reduction and
mixing.
"Préparé par la société UMA Engineering Ltd.--
Av.-pr.
Comprend des références bibliogr.
Cat. no. A15-1843/1990F
ISBN 0-660-92939-2

1. Fragmentation. 2. Broyeurs. 3. Malaxeurs et
mélangeurs. 4. Machines agricoles. I.
Rousseau, Normand, 1951- II. Birenbaum, Rhonda.
III. Heslop, L. IV. UMA Engineering Ltd. V.
Canada. Agriculture Canada. Direction générale
de la recherche. VI. Coll.: Publication
(Canada. Agriculture Canada). Français ; 1843.

TJ1225.H314 1990 631.3 C90-099107-0F

Rédaction-édition
Normand Rousseau
Service aux programmes de recherche

Contrat
Rhonda Birenbaum

Conseiller scientifique, recherches à contrat
L. Heslop
Centre de recherches techniques et de statistique

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos 5

1 **GÉNÉRALITÉS** 7

1.1 **Grosseur des particules** 7
1.2 **Structure des grains** 8
1.3 **Trituration mécanique et biologique** 10

2 **MÉTHODES DE TRITURATION** 10

2.1 **Broyeurs à marteaux** 11
2.2 Description et fonctionnement 11
2.3 Matières premières 12
2.4 Passes 13
2.5 Marteaux 14
2.6 Vitesse de rotation 16
2.7 Circulation d'air 17
2.8 Degré d'humidité 18
2.9 Alimentation 18
2.10 Transport des produits finis 19
2.11 Contrôle de la poussière 20
2.12 Installation, entretien et sécurité 20
2.13 Choix du broyeur 21
2.14 **Rouleuses à grains** 21
2.15 Description et fonctionnement 22
2.16 Caractéristiques 22
2.17 Rouleaux 23
2.18 Cannelures 23
2.19 Écartement 24
2.20 Vitesse de rotation 24
2.21 Alimentation 26
2.22 Roulage à sec et émiettement 28
2.23 Roulage humide 29
2.24 Roulage à la vapeur 29
2.25 Transport et stockage des produits roulés 30
2.26 Installation et entretien 30
2.27 **Analyse comparative des broyeurs et rouleuses** 31

3 **MÉLANGE** 31

3.1 **Objet** 31
3.2 **Théorie** 32
3.3 Densité apparente 33
3.4 Grosseur et forme des produits 33
3.5 Degré d'humidité 33
3.6 Temps de mélange 33
3.7 Admission et décharge des produits 34
3.8 Agitateurs 34
3.9 Catégories de mélangeurs 34
3.10 **Mélangeurs horizontaux par lot** 35
3.11 Agitateurs à ruban 35
3.12 Agitateurs à ailettes 36
3.13 Installation 36
3.14 Puissance nécessaire 36
3.15 **Mélangeurs verticaux par lot** 36
3.16 Admission et décharge des produits 36
3.17 Puissance nécessaire 37
3.18 **Analyse comparative des mélangeurs horizontaux et verticaux par lot** 37
3.19 **Mélangeurs rotatifs par lot** 38
3.20 **Mélangeurs en continu** 38
3.21 Mélangeurs à agitateur 38
3.22 Mélangeurs-proportionneurs 39
3.23 **Choix du mélangeur** 39
3.24 **Exemple : Préparation de rations pour vaches et progéniture, porcs et volaille** 40
3.25 **Traitement des grains** 40

4 **SYSTÈMES COMPLETS** 42

4.1 **Systèmes fixes** 42
4.2 Broyeurs-mélangeurs-proportionneurs 42
4.3 Ateliers de fabrication de granulés 43
4.4 **Systèmes mobiles** 44
4.5 Broyeurs-mélangeurs 44
4.6 Rouleuses-mélangeuses 45
4.7 Mélangeurs-alimenteurs 45
4.8 **Broyeurs à foin** 46
4.9 Broyeurs de petites balles 46
4.10 Broyeurs rotatifs 46

Bibliographie 48

Tableaux

1 Identification des passes et diamètre des orifices 7
2 Qualité de la mouture selon la taille des particules et le coefficient de finesse 9
3 Recommandations de production des moulées pour l'alimentation du cheptel 11
4 Vitesse des broyeurs à marteaux 16
5 Rapport entre la puissance nécessaire et le degré d'humidité pour deux broyeurs à marteaux standard 18
6 Rapport entre le rendement spécifique et le degré d'humidité du blé pour un broyeur équipé d'une passe de 3 mm 18
7 Débit d'une rouleuse à grains en fonction des cannelures, des dimensions des rouleaux et de la force motrice 23

8 Données du roulage à la vapeur 30
9 Rendement et diamètre géométrique moyen en fonction des orifices de la passe et de l'écartement des rouleaux 31
10 Rapport entre l'indice d'homogénéité et le rendement d'un mélangeur vertical par lot 33
11 Augmentation de rendement par traitement des grains 42
12 Rendement d'un broyeur rotatif équipé d'une passe de 51 mm 47

Figures

1 Répartition logarithmique d'une mouture de grains de sorgho pour une passe de 3,18 mm 8
2 Structure d'un grain de blé 10
3 Structure d'un grain de maïs denté 10
4 Schémas d'un broyeur à marteaux 12
5 Mouvement des particules entre la passe et les marteaux 12
6 Admission et broyage des produits 13
7 Rendement spécifique d'un broyeur selon différents grains 13
8 Débit de particules de maïs selon différentes passes 14
9a Rendement spécifique des broyeurs à petits marteaux 15
9b Rendement spécifique des broyeurs à gros marteaux 15
10 Marteaux standard et marteaux rechargés en dur 15
11 Rendement d'un broyeur selon le nombre de marteaux et l'espace libre entre les marteaux et la passe 16
12 Débit de maïs-grain d'un broyeur selon la vitesse du rotor 17
13 Décharge par gravité et décharge pneumatique selon l'augmentation de température en cours de broyage 17
14 Rendement spécifique selon l'admission d'air 17
15 Décharge pneumatique et par gravité de particules de maïs selon le degré d'humidité des grains 18
16 Rendement spécifique d'un broyeur selon la décharge pneumatique ou par gravité 20
17 Techniques de décharge et de transport des produits finis pour un broyeur à marteaux 20
18 Schéma du point d'union de deux conduites 21
19 Coupe transversale d'une rouleuse à grains 22
20 Vue latérale d'une rouleuse industrielle 22
21 Fonctionnement interne d'une rouleuse à deux couples de rouleaux 24
22 Cannelures pour le découpage en dés 24
23 Débit d'opération d'une rouleuse à grains de maïs selon l'écartement et le jeu de vitesse des rouleaux 25
24 Taille des particules de maïs selon le jeu de vitesse des rouleaux 25
25 Particules de maïs retenues selon le jeu de vitesse des rouleaux 26
26 Taille des particules de maïs selon l'écartement des rouleaux du bas 27
27 Dispositif d'alimentation en maïs-épis 28
28 Chambre de mélange humide 29
29 Boîte à vapeur accouplée à une rouleuse à grains 29
30 Coefficient de variation et densité apparente pour un mélangeur vertical par lot 32
31 Coefficient de variation et temps de mélange pour une ration à 100 % de grains 34
32 Coefficient de variation et temps de mélange pour une ration à 60 % de grains et 40 % de foin 34
33 Coefficient de variation et temps de mélange pour un mélangeur horizontal par lot 34
34 Agitateurs à spires uniformes et étirées dans des mélangeurs verticaux par lot 35
35 Mélangeur horizontal par lot avec agitateur à double ruban 35
36 Mélangeur horizontal par lot avec agitateur à ailettes 36
37 Schéma et fonctionnement d'un mélangeur vertical par lot 37
38 Mélangeur vertical par lot à alimentation au sol 37
39 Différentes vis de mélange 38
40 Mélangeur en continu 38
41 Diagramme d'une opération de mélange 39
42 Appareil de traitement des grains accouplé à une chambre d'enrobage 40
43 Différentes vis d'enrobage 41
44 Appareil de traitement des grains par vaporisation 41
45 Appareil de traitement des grains par pulvérisation 41
46 Broyeur-mélangeur-proportionneur 42
47 Broyeur-mélangeur-proportionneur accouplé à une rouleuse à grains 42
48 Atelier simple de fabrication de granulés 43
49 Atelier complexe de fabrication de granulés 44
50 Mélangeur-broyeur mobile 45
51 Coupe transversale d'un mélangeur-alimenteur 45
52 Mélangeur-alimenteur remorqué 45
53 Broyeur rotatif 46

AVANT-PROPOS

La série *Manutention de produits agricoles* comprend plusieurs volumes destinés aux concepteurs des systèmes de manutention pour les exploitations agricoles et les industries connexes. Chaque volume porte sur le choix et les caractéristiques d'une catégorie précise d'appareils de manutention et de traitement des produits. Les appareils peuvent fonctionner de manière autonome ou dans le cadre d'une installation complète, auquel cas le concepteur devra éventuellement consulter plusieurs volumes de la série.

Le volume *Appareils de trituration et de mélange* a été préparé par la société UMA Engineering Ltd., de Winnipeg (Man.), pour le Comité canadien du génie rural, Comité de coordination des services agricoles du Canada.

1 GÉNÉRALITÉS

Par trituration, on entend les procédés mécaniques qui consistent à couper, à déchiqueter, à écraser, à broyer et à moudre les grains de provende. Tous ces procédés brisent les matières premières pour en améliorer la digestibilité, mais sans modifier leurs propriétés chimiques. La trituration facilite aussi la préparation de mélanges homogènes. Néanmoins, les différents procédés réussissent rarement à rendre uniformes la grosseur et la forme des particules.

On peut définir comme suit les différents procédés de trituration :

- Couper signifie hacher les particules au moyen d'une lame tranchante.
- Écraser signifie exercer une pression sur les précédentes.
- Déchiqueter comprend les deux notions pression ou choc.
- Broyer signifie réduire les particules par percussion.
- Moudre signifie réduire les grains en farine. Cette notion comprend le dépelliculage, la scarification, le polissage, le triage, le mélange, ainsi que certaines réactions chimiques. Moudre s'applique parfois à la séparation des fibres de lin, de chanvre et de ramie.

Dans le secteur agricole au Canada, on utilise surtout les broyeurs à marteaux et rouleuses à grains pour triturer les matières premières. Les broyeurs à marteaux permettent de fabriquer des granulés et d'obtenir des moutures. Les rouleuses à grains, pour leur part, donnent des produits de texture relativement uniforme, légèrement pulvérisés.

Les matières premières possèdent des propriétés rhéologiques très différentes. Néanmoins, les procédés de trituration doivent produire les résultats escomptés de la manière la plus efficace et la plus économique possible.

Le mélange consiste à incorporer différents ingrédients en une préparation précise dont chaque échantillon comprend une proportion donnée de chaque ingrédient. Mélanger avec précision des produits aux caractéristiques bien différentes peut s'avérer très difficile. Les ingrédients secs des moulées peuvent présenter des écarts de densité considérables. Les différences de grosseur, de forme, de poids, de charge électrostatique et d'adhérence peuvent provoquer la séparation des composantes. Par ailleurs, les liquides présentent aussi des écarts de densité et de viscosité qui peuvent affecter les caractéristiques des ingrédients secs auxquels ils sont mélangés.

1.1 Taille des particules

On évalue la performance des appareils de trituration en se fondant sur les paramètres suivants :

- le débit
- la puissance nécessaire par unité de trituration
- la qualité des produits finis
- l'homogénéité des produits finis

Pour évaluer la performance d'un appareil de trituration, il faut disposer d'une méthode de mesure des particules de matières premières. Pour les particules sphériques ou cubiques, il faut utiliser la norme ASAE S319.1 de l'American Society of Agricultural Engineers, «Method of Determining and Expressing Fineness of Feed Materials by Sieving». Pour le foin haché et les grains roulés ou en flocons, on applique la norme E11 de l'American Society for Testing and Materials (ASTM). Cette norme identifie toute une série de passes à utiliser pour mesurer les produits dans lesquels il y a surtout des particules allongées. Le tableau 1 précise les passes recommandées par l'ASTM.

Pour évaluer la trituration des produits, on prend comme sujet un échantillon de 100 grammes, puis, sur du papier à réglure logarithmique pour études de probabilité, on trace la droite représentant le pourcentage global de poids retenu par chaque passe par rapport au diamètre des orifices. Le point où cette droite coupe la ligne du 50 % correspond au diamètre géométrique moyen des particules.

Tableau 1 Identification des passes et diamètre des orifices

Numéro d'identification (norme des États-Unis)	Diamètre des orifices (mm)
4	4,76
6	3,36
8	2,38
12	1,68
16	1,19
20	0,841
30	0,595
40	0,420
50	0,297
70	0,210
100	0,149
140	0,105
200	0,074
270	0,053

On définit la grosseur des particules en fonction du diamètre géométrique moyen et de l'écart-type géométrique par poids. Pour obtenir ces résultats, il faut utiliser les équations suivantes :

$$D_g = \log^{-1} \frac{\Sigma (W_i \log \bar{D}_i)}{\Sigma W_i}$$

$$s_g = \log^{-1} \frac{\Sigma W_i (\log \bar{D}_i - \log D_g)^2}{\Sigma W_i}^{0,5}$$

dans lesquelles,

D_i = diamètre des orifices de la passe i

$D_i + 1$ = diamètre des orifices de la passe immédiatement plus grosse que la passe i

$\bar{D}_i$ = diamètre géométrique moyen des particules s'échappant par la passe i

= $(D_i \times D_i + 1)^{0,5}$

D_g = diamètre géométrique moyen

s_g = écart-type géométrique

W_i = fraction de poids de la passe i

Σ = sommation

On considère que les particules s'échappant par la passe U.S. 270 (tableau 1) ont un diamètre moyen de 44 mm.

Le calcul des données sur du papier à réglure logarithmique pour études de probabilité permet d'obtenir une représentation graphique du diamètre géométrique moyen et de l'écart-type logarithmique normal. La figure 1 donne un exemple, dans lequel :

$D_g = D_{50}$

= diamètre des particules selon une probabilité de 50 %

$s_g = D_{84} / D_{50}$

$= D_{50} / D_{16}$

= taille des particules selon une probabilité de 84 % divisée par D_g

= D_g divisé par le diamètre des particules selon une probabilité de 16 %

ou $D_g = 350\ \mu m$

$s_g = 640 / 350$

$= 350 / 191$.

$= 1,83$

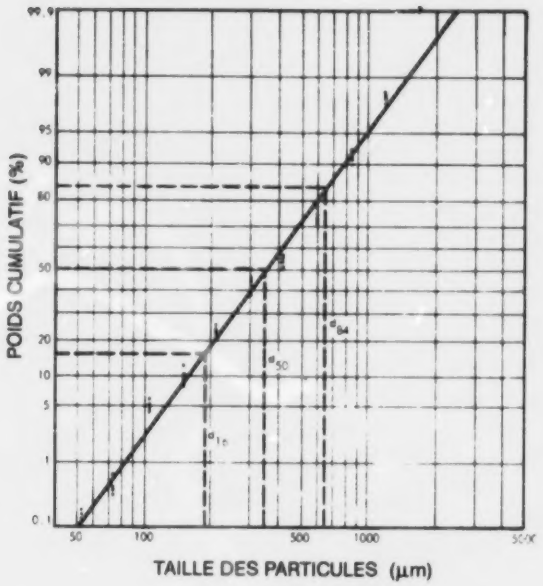


Fig. 1 Répartition logarithmique d'une mouture de grains de sorgho pour une passe de 3,18 mm.

Le tableau 2 montre la taille grossière, moyenne et fine des particules issues des moutures. Il précise aussi le coefficient de finesse, soit la moyenne pondérée de la taille des particules. Cette mesure n'est plus approuvée par l'ASAE, mais figure encore dans la documentation des appareils.

1.2 Structure des grains

Un grain est un fruit monogerme comprenant l'embryon, l'albumen et le tégument (fig. 2). Parfois, des tissus nucellaires comblent l'espace entre l'albumen et le tégument. Le péricarpe (enveloppe du fruit) entoure le grain et y adhère fermement.

Le péricarpe forme la plus grande partie du son. Il comprend une couche extérieure (épicarpe) et des couches intérieures (mésocarpe et endocarpe). L'endocarpe renferme la couche de cellules tributives. Ces cellules couvrent tout le grain du maïs (fig. 3), mais seulement certaines parties des grains de blé et d'autres céréales. Le revêtement extérieur de l'épicarpe est cutinisé, protégeant ainsi le grain contre l'humidité.

L'épicarpe et l'endocarpe ne montrent aucun méat intercellulaire. Leurs cellules adhérentes, aux parois épaisses, forment une voûte tubulaire bombée et rigide qui confère de bonnes propriétés structurales aux grains. La résistance du péricarpe et la capacité de l'éliminer par gros morceaux dépendent d'ailleurs de ces propriétés structurales.

Tableau 2 Qualité de la mouture selon la taille des particules et le coefficient de finesse

Produit	Grain entier	Mouture grossière	Mouture moyenne	Mouture fine	Mouture très fine
Grains					
Maïs-épi	-	6150 (4,8)	2680 (3,6)	1160 (2,4)	770 (1,8)
Maïs-grain	14 100 (6,0)	6150 (4,8)	2680 (3,6)	1160 (2,4)	770 (1,8)
Orge	7070 (5,0)	3790 (4,1)	2030 (3,2)	1090 (2,3)	620 (1,5)
Avoine	5000 (4,5)	2870 (3,7)	1650 (2,9)	950 (2,1)	580 (1,4)
Soja	14 100 (6,0)	6150 (4,8)	2680 (3,6)	1160 (2,4)	770 (1,8)
Blé	7070 (5,0)	3790 (4,1)	2030 (3,2)	1090 (2,3)	620 (1,5)
Fourrages					
Luzerne	–	3540 (4,0)	1890 (3,1)	1020 (2,2)	580 (1,4)
Maïs	–	10 000 (5,5)	4060 (4,2)	1650 (2,9)	– –

Remarque : Les chiffres entre parenthèses indiquent le coefficient de finesse.

L'albumen est une masse continue de tissus, contrairement au péricarpe, au tégument et à la nucelle, autant de couches discontinues, qui adhèrent les unes aux autres. Les cellules de la couche extérieure de l'albumen ont des parois épaisses, sont cubiques et dépourvues d'amidon. Ces cellules à aleurone renferment des protéines et des huiles. Elles font partie du son.

Les cellules de la couche intérieure amidée de l'albumen sont grosses et irrégulières. Les méats intercellulaires y sont inexistants ou presque. Les cellules sont allongées et comportent des projections s'étirant horizontalement à partir du centre.

Le broyage brise les cellules de l'albumen. Pour ce faire, la force requise est moindre pour la couche intérieure, puisque les cellules renferment surtout de l'amidon alors que l'essentiel des cellules de la couche extérieure contient des protéines. Ces dernières sont d'ailleurs plus petites et pourvues de parois plus épaisses.

La microstructure des cellules de l'albumen influe aussi sur le broyage. Chaque cellule renferme des granules d'amidon, enrobées par une matrice protéinique. Les particules de la farine de blé dur sont souvent composées des cellules de l'albumen. Dans le blé tendre, la matrice protéinique est plus faible et la farine est alors formée de granules individuelles d'amidon et de morceaux de matrice.

Le broyage à sec produit de la farine de blé à partir de l'albumen amidé des grains de blé. Cependant, l'épaisseur irrégulière de la couche d'aleurone complique la séparation de tout l'albumen amidé. Le broyage du maïs est plus facile. Son albumen amidé donne de l'amidon de maïs par broyage humide et de la farine de maïs par broyage à sec.

L'embryon des grains de céréales comprend le blaste et le scutellum. Le blaste est une plante embryonnaire qui se développe à la germination. Le scutellum est l'organe d'alimentation des cotylédons. L'embryon contient peu d'amidon, mais beaucoup d'huile et de protéines. C'est l'embryon qui donne le germe de blé et l'huile de maïs. L'embryon étant une composante distincte des grains, il s'en détache facilement.

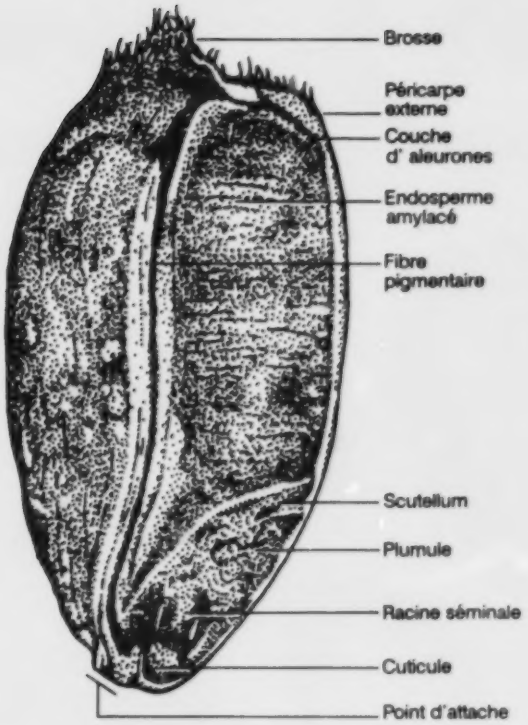


Fig. 2 Structure d'un grain de blé.

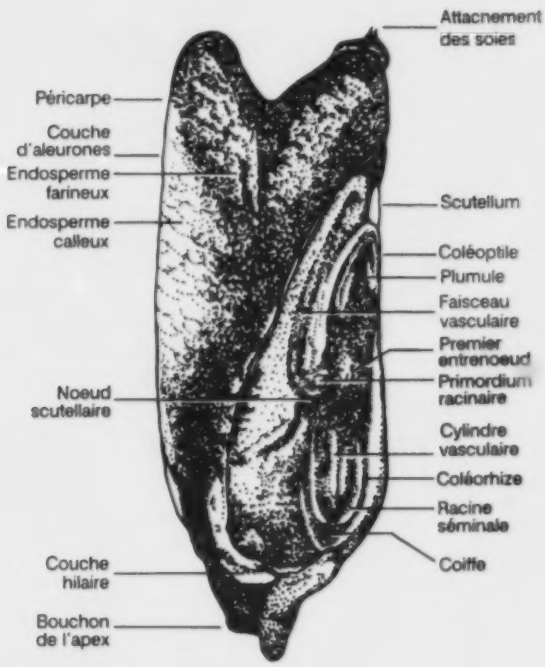


Fig. 3 Structure d'un grain de maïs denté.

1.3 Trituration mécanique et biologique

La trituration mécanique des aliments améliore la capacité de trituration biologique des animaux, c'est-à-dire la mastication et la digestion. La réalisation d'un équilibre idéal entre régime mécanique et régime biologique permet aux producteurs de moulées de profiter pleinement des matières premières et de réaliser des revenus. L'équilibre idéal correspond au point de broyage au-delà duquel la trituration mécanique ne facilite plus la digestion.

La trituration mécanique modifie les propriétés physiques des grains et ainsi facilite la trituration biologique :

- en améliorant le goût des aliments
- en diminuant l'effort de mastication
- en transformant davantage d'amidon en énergie alimentaire
- en augmentant l'apport d'éléments nutritifs

La trituration mécanique excessive peut, toutefois, se traduire par une diminution de la transformation des aliments en énergie. Chez certains animaux, une mouture fine provoque l'élimination trop rapide des rations. Les aliments ne séjournent pas assez longtemps dans le système digestif pour que leurs fibres soient entièrement digérés.

Le type de moulée et l'animal visé sont déterminants pour le choix du procédé de trituration mécanique et la grosseur des particules. Le tableau 3 résume les recommandations concernant le traitement des aliments.

La rentabilité des opérations demeure le facteur le plus déterminant du degré de trituration mécanique. L'apport nutritif que procure la transformation des aliments par trituration mécanique doit surpasser le coût des opérations pour qu'elles soient rentables et profitables.

2 MÉTHODES DE TRITURATION

Plusieurs objectifs justifient la trituration des particules de grains dans la fabrication des moulées :

- restreindre le volume d'aliments absorbés et non digérés
- éliminer des aliments les déchets qui n'ont pas de goût
- améliorer le goût des aliments
- faciliter le mélange et l'équilibre des rations
- faciliter la digestion des aliments par une plus grande imprégnation des aliments par les sucs digestifs

Tableau 3 Recommandations de production des moulées pour l'alimentation du cheptel

Animaux	Grain	Fourrage	Commentaires
Bovins	Sec ou roulé à la vapeur ou moulu grossièrement	Foin long et bon, sauf dans les lots commerciaux	Grains secs ou roulés à la vapeur ou moulus grossièrement, bons pour la majorité des bovins
	La mouture fine n'est pas recommandée parce qu'elle peutaugmenter l'incidence de la parakeratose chez les bovins nourris au champ	Fourrage tranché (5 mm) en cubes ou granulés dans les lots commerciaux ou là ou la qualité du foin est pauvre. Cette sorte de foin se manipule avec facilité et il y a peu de gaspillage. La mouture fine du foin diminue la digestibilité	Pas nécessaire de traiter les grains pour les veaux de moins de 6 mois parce qu'ils mastiquent la nourriture totalement
Bovins laitiers	La mouture est la méthode la plus simple et la plus utilisée	Foin long, cubes ou ensilage tranché	Fourrage grossier finement moulu diminue la production d'acétate dans le rumen et le gras
Moutons et chèvres	Pas de traitement à moins que les grains soient durs ou les dents faibles	Tranché à 50 mm de long	Étant donné que les moutons et chèvres mastiquent leur nourriture plus que les bovins, pas besoin de traitement
Porcs	Moudre finement le maïs, l'orge,l'avoine et le sorgho	Les légumineuses employées dans les mélanges doivent être moulues	La mouture fine peut causer la formation de ponts dans les silos
	Mouture moyenne à grossière pour le blé car une mouture fine le rend pâteux et moins savoureux		La nourriture moulue fine peut causer des ulcères d'estomac
Volailles	Mouture fine moyenne broyée	Moudre le foin	
Chevaux	Pour les chevaux qui ont de bonnes dents, le traitement augmente la valeur de l'avoine de 5 %	Foin long	On ne doit pas servir aux chevaux de la nourriture poussiéreuse

Source : Ensminger et Olentine, (1978).

- améliorer la qualité des granulés

Les deux appareils de trituration les plus utilisés sont le broyeur à marteaux et la rouleuse à grains.

2.1 Broyeurs à marteaux

2.2 *Description et fonctionnement* Le broyeur à marteaux est l'appareil de trituration des particules le plus courant. Il convient aussi bien pour les plantes fourragères que pour les grains.

La figure 4 montre deux plans d'un broyeur à marteaux. C'est le choc des marteaux, oscillant librement autour d'un arbre, qui assure le broyage. Les marteaux frappent les produits dès leur admission dans le broyeur et chaque fois qu'un obstacle ramène les produits dans leur champ.

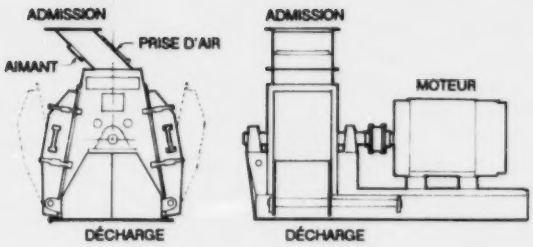


Fig. 4 Schémas d'un broyeur à marteaux.

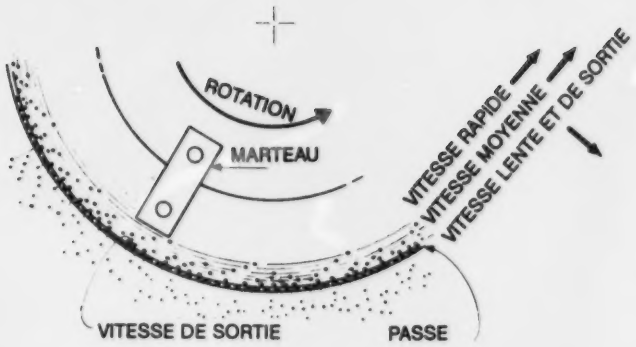


Fig. 5 Mouvement des particules entre la passe et les marteaux.

L'alimentation du broyeur se fait par le haut. La trémie d'alimentation comprend différents mécanismes de contrôle de débit, d'admission d'air et d'élimination des corps étrangers métalliques et autres.

Dans la chambre de broyage, les marteaux frappent les matières premières en tournant. Les particules triturées tournent dans le tambour, entraînées par les marteaux, en épousant la forme de la passe.

L'accumulation des particules forme une couche dont la partie intérieure tourne rapidement sous le jeu des marteaux et dont la partie extérieure tourne plus lentement puisqu'elle est ralentie par le frottement avec la passe. Lorsque les particules de la partie extérieure sont plus petites que les orifices de la passe et ne sont pas retenues par la force centrifuge du broyeur, elles tombent par ces orifices dans une trémie de décharge. La figure 5 montre le mouvement des particules entre la passe et les marteaux.

Dans la plupart des broyeurs à marteaux, les produits sont admis dans la chambre de broyage en une courbe presque tangente à la rotation des marteaux, sinon directement sur les marteaux. La figure 6 (*a* et *b*) montre les deux modes d'alimentation et les points de collision dans une chambre de broyage à passe complète.

De plus en plus, on remarque une plaque-couteau (appelée aussi plaque-brisoir) dans les broyeurs à marteaux. La plaque-couteau coupe les particules avant qu'elles ne soient entraînées sur la passe. La plaque-couteau permet aux broyeurs ainsi équipés d'obtenir un débit supérieur avec une surface de passe réduite. La plaque-couteau sert tout particulièrement au broyage des produits fibreux ou de mouture difficile. La plaque-couteau intercepte aussi les particules pour les renvoyer dans le champ d'action des marteaux. La figure 6*c* montre une chambre de broyage équipée d'une plaque-couteau et montre aussi le mouvement des particules.

Pour bien utiliser un broyeur à marteaux, il faut tenir compte des points suivants :

- les matières premières
- la passe et les marteaux
- la vitesse de rotation
- le transport des produits finis
- le degré d'humidité des produits
- l'admission des produits
- l'installation et l'entretien

2.3 *Matières premières* Les matières premières utilisées dans les moulées appartiennent à deux catégories :

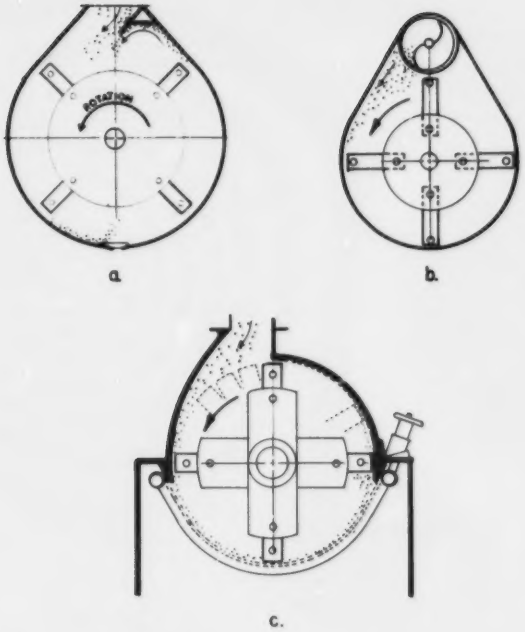


Fig. 6 Admission et broyage des produits.

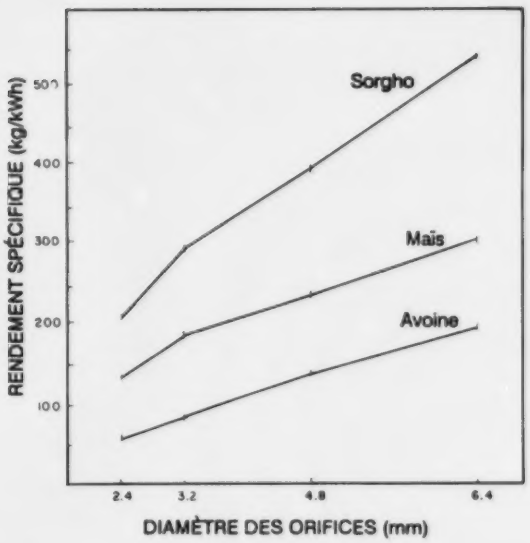


Fig. 7 Rendement spécifique d'un broyeur selon différents grains.

- Les grains fibreux, non friables (comme l'avoine), que l'on ne peut tamiser, les légumineuses et les plantes fourragères (comme la luzerne) sont des produits de mouture difficile.
- Les grains non fibreux, friables (comme le maïs, le blé, l'orge, le sorgho et le tourteau) sont des produits de mouture facile.

C'est la fragilité des grains non fibreux et friables qui en facilite le broyage. Ces grains sont habituellement très denses. Pour l'autre catégorie, les fibres entraînent des difficultés de broyage.

Les broyeurs qui traitent les grains de mouture facile devraient comprendre l'équipement nécessaire pour assurer le transport rapide des produits finis. La trituration des produits fibreux et non friables consomme davantage d'énergie, si bien qu'il faut examiner avant tout les facteurs susceptibles d'augmenter le débit par unité de puissance d'entrée. La figure 7 montre la puissance nécessaire pour broyer différents grains (maïs, sorgho, avoine).

2.4 *Passes* Les passes des broyeurs à marteaux sont soumises aux trois variables suivantes :

- le diamètre des orifices
- la position de la passe
- la zone d'efficacité

La passe permet d'obtenir une mouture homogène, étant donné que la grosseur moyenne des particules qui s'échappent de la chambre de broyage est inférieure au diamètre des orifices. Les produits restent emprisonnés dans le tambour jusqu'à ce que les particules soient triturées au point de passer dans les orifices. Plus les orifices sont gros, plus vite les particules s'échappent de la chambre de broyage, la mouture étant plus grossière. Le débit augmente alors en parallèle. La figure 8 montre que le débit de maïs-grain est presque multiplié par deux lorsque le diamètre des orifices passe de 2,4 à 6,4 mm.

Dans la plupart des broyeurs à marteaux, la passe est installée selon deux manières distinctes dans la chambre de broyage. Souvent, la passe couvre le pourtour de la chambre de broyage sur presque 360°. Les fabricants prétendent qu'une telle surface de passe diminue le volume de produits tournant dans la passe et favorise ainsi une décharge plus rapide des particules de calibre approprié. Cette position convient tout particulièrement pour les produits de mouture difficile.

Dans d'autres broyeurs, la passe couvre le fond de la chambre de broyage, sur 180° du pourtour. L'utilisateur peut facilement remplacer la passe ainsi que la retourner lorsque les crêtes des orifices sont usées. La figure 6 montre la position de la passe dans la chambre de broyage.

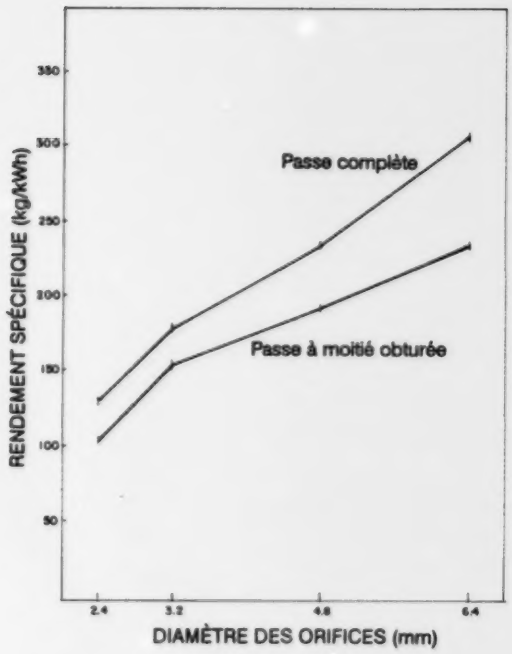


Fig. 8 Débit de particules de maïs selon différentes passes.

La surface de passe influe sur le rendement des broyeurs, puisqu'elle détermine le débit, qu'importe la puissance d'entrée. Certains fabricants vendent des broyeurs de volume comparable, répartis sur toute une gamme de puissances d'entrée. Mais plus souvent, ils offrent des broyeurs de volume différent, dotés d'une même puissance.

La diminution de la surface de passe sans augmentation de la puissance d'entrée a pour effet de diminuer le débit et d'augmenter la chaleur et le volume de poussières. La diminution de la moitié de la surface de passe affecte le débit du broyeur, peu importe le diamètre des orifices. Selon les données de la figure 8 (maïs-grain et orifices de 4,8 mm), la diminution de la moitié de la surface de passe a fait chuter le rendement d'environ 60 kg/kWh.

La zone d'efficacité de la passe correspond aux orifices par lesquels peuvent s'échapper les particules. Il faut utiliser la passe avec la plus grande zone d'efficacité. Sur la plupart des passes, les orifices sont disposés en quinconce. L'espace entre chaque orifice, soit la distance d'un centre à l'autre, est égal ou légèrement inférieur au diamètre des orifices. Les passes plus épaisses ont tendance à diminuer le débit des broyeurs.

Certains fabricants offrent des passes dont les orifices sont disposés à angle. Les particules peuvent ainsi s'échapper plus facilement qu'elles ne le font lorsque les orifices sont perpendiculaires à la surface de la passe. Aucune information quantitative indépendante n'est disponible pour étoffer les avantages de ces passes.

2.5 *Marteaux* Dans un broyeur à marteaux, la trituration a lieu aux points de collision des marteaux et des produits. Pour obtenir la texture souhaitée et le débit optimal, il faut bien choisir le type, les dimensions et la disposition des marteaux. Un choix qui revêt une importance encore plus grande lorsque les produits appartiennent à la catégorie de mouture difficile.

Le nombre et les dimensions appropriés des marteaux dépendent des propriétés des matières premières ainsi que des autres caractéristiques du broyeur. Pour en arriver à la configuration juste, l'utilisateur doit tenir compte des facteurs suivants :

- le nombre de marteaux
- les produits à broyer
- le volume respectif des produits

L'utilisateur doit aussi veiller à ce que l'appareil exploite toute la surface de passe disponible.

Pour obtenir une mouture fine, la plupart des utilisateurs optent pour un nombre accru de marteaux. Dans un broyeur à vitesse fixe de rotation, la suppression de quelques marteaux donne habituellement une mouture plus grossière, sans avoir à changer la passe.

L'expérience montre que les marteaux minces donnent de meilleurs résultats que les marteaux plus épais. Leurs plans de coupe sont plus aiguisés et frappent plus souvent les produits à broyer. Par contre, les marteaux plus épais résistent mieux à l'usure.

Les figures 9*a* et 9*b* illustrent l'incidence de l'épaisseur des marteaux sur le débit des broyeurs. Les données confirment l'efficacité accrue des marteaux étroits sur les marteaux larges.

Pour obtenir de bons résultats et ne pas souffrir trop vite de l'usure, on utilise des marteaux épais et aiguisés. Le marteau rechargé en dur correspond à ces caractéristiques. Il porte une pointe très dure en alliage d'acier, traitée thermiquement (par exemple, en carbure de tungstène). Le centre du marteau est mou, mais son revêtement est exceptionnellement robuste. La pointe rechargée en alliage d'acier a un effet d'entaillage qui produit une crête affilée. Compte tenu du centre mou, la pointe des marteaux devient concave avec l'usure, ce qui donne deux bords tranchants. La figure 10 illustre l'usure des marteaux standards et des marteaux rechargés en dur.

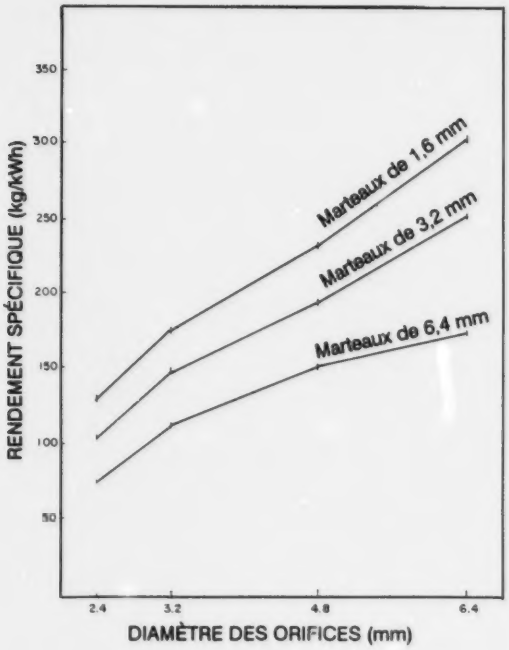


Fig. 9a Rendement spécifique des broyeurs à petits marteaux.

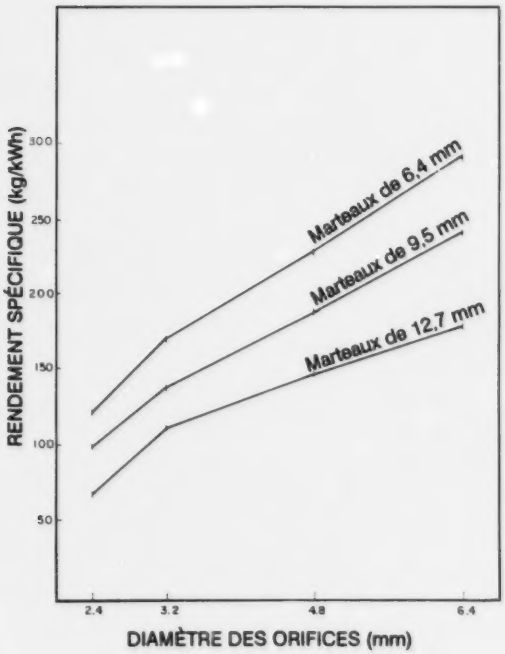
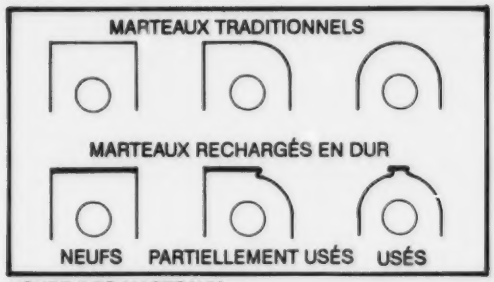
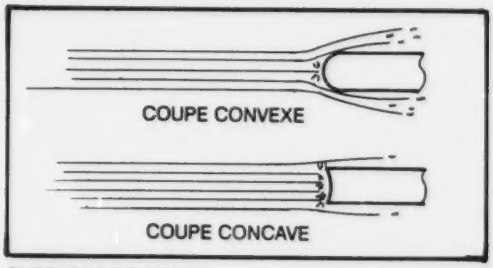


Fig. 9b Rendement spécifique des broyeurs à gros marteaux.



USURE DES MARTEAUX



SURFACES DE COUPE

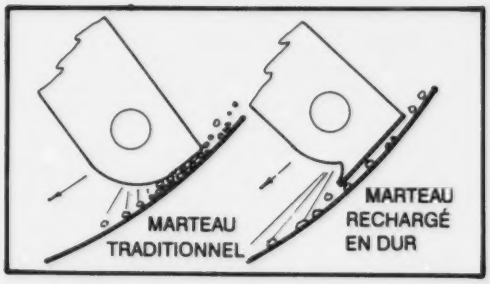


Fig. 10 Marteaux standard et marteaux rechargés en dur.

Le marteau de 6,35 mm rechargé en dur est probablement le plus utilisé en Amérique du Nord. On peut l'installer dans presque tous les broyeurs et obtenir de bons résultats.

La disposition des marteaux joue sur leur usure et sur celle de la passe. Pour user également toute la surface de passe, il faut décaler les marteaux sur toute la surface de l'arbre. Sinon, l'usure de la passe se fait par corridors.

Il faut aussi disposer les marteaux de manière à ce que l'excédent de produits ne s'accumule pas en un seul endroit du rotor. Dans bien des cas, l'action dirige un plus gros volume de produits sur les côtés du rotor où les marteaux s'usent plus vite.

L'espace libre entre les marteaux et la passe influe aussi sur le rendement du broyeur. Lorsque cet espace est étroit, les produits qui

tournent contre la passe circulent rapidement dans la chambre de broyage. Le frottement des marteaux contre cette couche de moulée multiplie les chocs avec les particules ainsi que le volume de poussières, en plus d'accélérer l'usure des marteaux et de la passe. Lorsque l'espace libre est plus large, les marteaux s'éloignent de la couche de particules ce qui réduit la vitesse de rotation et favorise ainsi une décharge plus rapide. L'éloignement produit moins de poussières et limite l'usure des marteaux et de la passe.

L'expérience montre que la suppression de 25 % du jeu complet de marteaux améliore de 10 % le rendement de certains broyeurs. En augmentant l'espace libre entre les marteaux et la passe, on améliore encore plus le rendement (fig. 11), dans la mesure où une mouture grossière est acceptable. Ces interventions ne conviennent pas à toutes les situations. Avant de se lancer dans une production intensive, l'utilisateur doit effectuer des essais pour préciser les conditions idéales de fonctionnement.

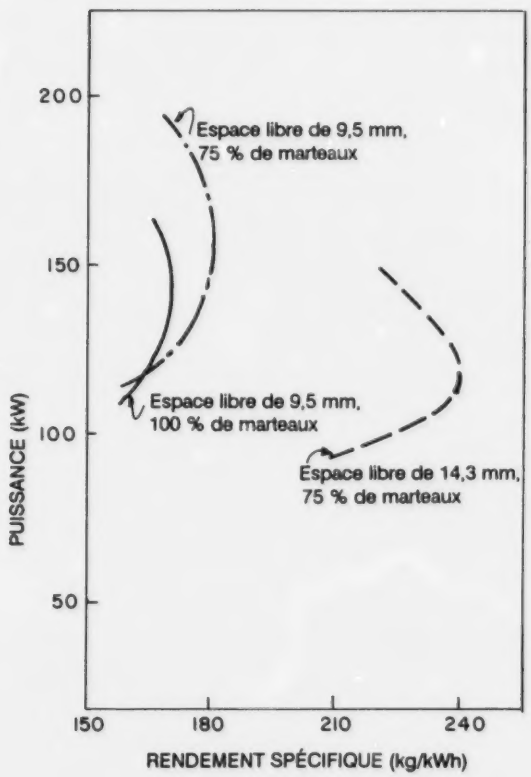


Fig. 11 Rendement d'un broyeur selon le nombre de marteaux et l'espace libre entre les marteaux et la passe. Source : Koppers Co., Inc.

2.6 *Vitesse de rotation* Les broyeurs à marteaux utilisés en Amérique du Nord sont des appareils à haute révolution (3 600 r/min) ou des appareils à faible révolution (1 800 r/min), selon la vitesse du rotor. Les broyeurs à haute révolution ont habituellement un rotor de petit diamètre tandis que les broyeurs à faible révolution ont un rotor de gros diamètre.

La vitesse des pointes de marteau est égale ou presque chez divers fabricants et pour différentes vitesses de rotor. C'est la vitesse de passage des pointes de marteau qui détermine la performance du broyeur. Le tableau 4 précise les différents diamètres du rotor et les vitesses de fonctionnement.

La plupart des broyeurs fonctionnent avec des raccords flexibles à entraînement direct, qui règlent la vitesse de fonctionnement. Pour les appareils à entraînement par courroie, il est possible d'ajuster la vitesse du rotor en fonction des conditions de travail, mais en haute performance, ces appareils sont coûteux et volumineux.

Pour une mouture fine et pour les produits de mouture difficile, il vaut mieux utiliser un broyeur à haute révolution, équipé d'un rotor de petit diamètre. Pour une mouture fine au moyen d'une passe dont les orifices sont inférieurs à 3,2 mm, le rotor à haute révolution assure un débit supérieur. Les broyeurs à faible révolution sont nettement supérieurs pour une production de mouture grossière. À très haute vitesse de rotation, les produits circulent parallèlement à la surface de la passe et la décharge se fait mal. À vitesse réduite, les particules s'accrochent dans les orifices de la passe et s'échappent plus facilement.

Tableau 4 Vitesse des broyeurs à marteaux

	Diamètre du rotor (mm)	Vitesse périphérique (r/min)	Vitesse périphérique (m/min)
A	460	3600	5180
B	530	3600	6040
C	610	3600	6890
D	760	1800	4300
E	910	1800	5180
F	1070	1800	6040
G	1220	1800	6890

Remarque : Les broyeurs C et G ont une vitesse périphérique identique, mais ne donnent pas nécessairement les mêmes résultats. La courbure du corps du broyeur C est beaucoup plus grande et la force centrifuge supérieure pousse les particules contre la passe, améliorant ainsi l'efficacité du broyage. La force centrifuge est nettement inférieure dans le broyeur G.

La figure 12 montre l'incidence de la vitesse sur le débit de maïs-grain d'un broyeur à un seul marteau.

2.7 *Circulation d'air* La circulation d'air par la passe améliore le rendement de la plupart des broyeurs. En tournant, les marteaux agissent comme un ventilateur et exercent une pression d'air contre la passe, ce qui favorise l'évacuation de l'air, des poussières et des particules.

Il faut s'assurer que l'air circule par les orifices de la passe :

- pour prévenir le colmatage de la passe
- pour prévenir le surchauffage
- pour augmenter le débit
- pour dépoussiérer la chambre de broyage

Une circulation d'air insuffisante se traduit par une accumulation de l'humidité des produits en cours de broyage. Cette accumulation produit des pains de mouture qui bloquent les orifices de la passe. Une circulation d'air appropriée dissipe l'humidité et prévient le colmatage des voies de décharge.

La circulation d'air est particulièrement profitable lorsque les orifices de la passe ont un diamètre inférieur à 2,75 mm. Ces passes ont tendance à s'obstruer facilement, compte tenu de la finesse de la mouture. Le temps froid accentue les problèmes de colmatage causés par l'humidité des produits, notamment lorsque la température tombe sous le point de congélation.

Une circulation d'air appropriée dans le broyeur freine la hausse de température en cours de fonctionnement. La figure 13 compare cette hausse de température avec et sans

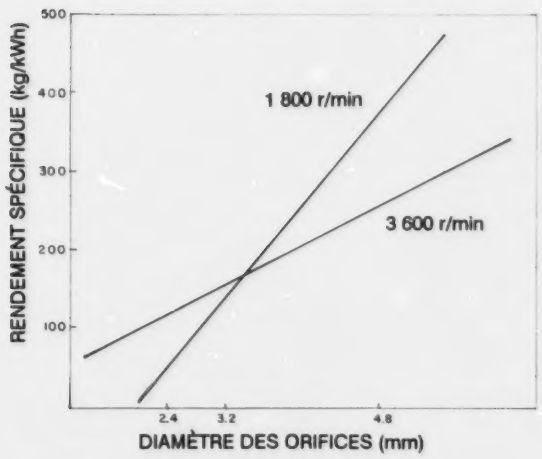


Fig. 12 Débit de maïs-grain d'un broyeur selon la vitesse du rotor. Source : Canadian Feed Manufacturers Technology.

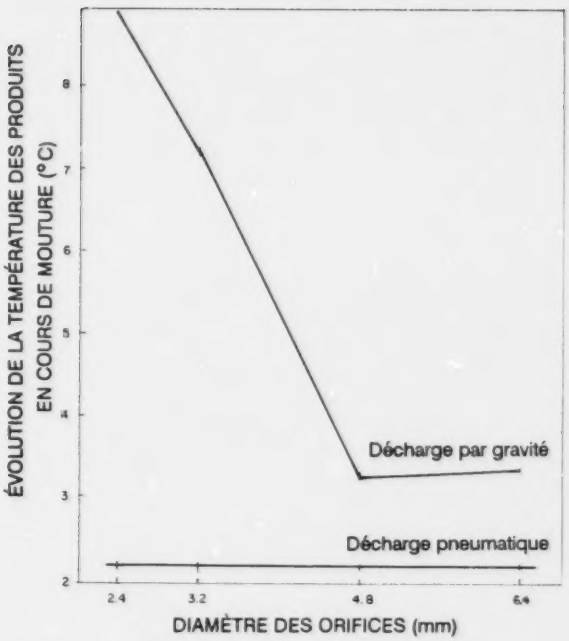


Fig. 13 Décharge par gravité et décharge pneumatique selon l'augmentation de température en cours de broyage. Source : Canadian Feed Manufacturers Technology.

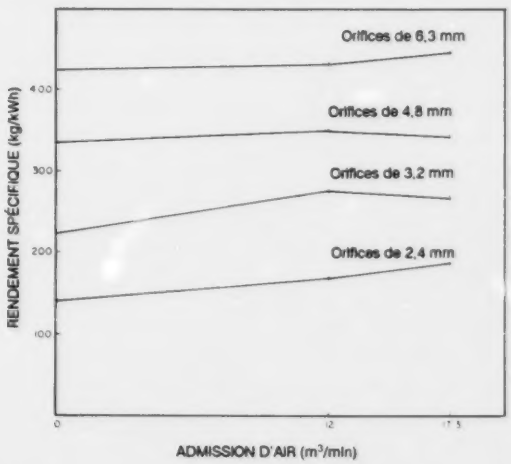


Fig. 14 Rendement spécifique selon l'admission d'air. Source : Canadian Feed Manufacturers Technology.

circulation d'air pour une opération de broyage du maïs-grain dans un broyeur équipé d'une passe de 2,4 mm. Dans le premier cas, la température monte de 2,4 °C. Dans le second, elle grimpe de 9 °C.

L'augmentation de la circulation d'air contribue à obtenir un débit optimal, notamment pour les produits de mouture difficile, comme l'avoine et la luzerne. La figure 14 compare le rendement d'un broyeur à marteaux avec et

sans admission d'air, laquelle augmente le débit de 10 à 15 % dans le cas à l'étude.

Il n'est pas facile de préciser le volume d'air requis pour assurer le rendement optimal et l'économie de fonctionnement d'un broyeur. Les fabricants se fient sur une règle empirique, soit de 200 à 400 L d'air par minute et par kilowatt de force motrice.

2.8 *Degré d'humidité* Le degré d'humidité des matières premières influe considérablement sur le débit des broyeurs à marteaux. Une légère augmentation du degré d'humidité se traduit par une diminution notable du rendement spécifique. La farine tirée des grains à haut degré d'humidité est légèrement plus grossière que la farine tirée des grains à faible degré d'humidité. Libérée en cours de broyage, l'humidité peut se condenser dans les silos et les transporteurs pour gêner la décharge des produits finis. Une circulation d'air appropriée dans le broyeur suffit habituellement à prévenir les problèmes associés au degré d'humidité des produits.

Le tableau 5 établit le rapport entre la puissance nécessaire et le degré d'humidité pour deux broyeurs courants. Le premier (A) est un broyeur de force motrice moyenne, tandis que le deuxième (B) est beaucoup plus gros. Pour maintenir un débit constant avec des produits au degré d'humidité supérieur de 6 %, l'appareil A a dû consommer 59 % plus d'énergie. Avec des produits au degré d'humidité supérieur de 7 %, l'appareil B a dû, pour sa part, consommer 34 % plus d'énergie.

La figure 15 compare une mouture de maïs à degré d'humidité normal avec une mouture de maïs à haut degré d'humidité. Dans l'exemple donné, le broyeur à marteaux est équipé d'une passe de 3,2 mm. Le haut degré d'humidité diminue le rendement de l'appareil de 46 kg/kWh. Les résultats obtenus pour une mouture de blé sont comparables (tableau 6).

Tableau 5 Rapport entre la puissance nécessaire et le degré d'humidité pour deux broyeurs à marteaux standard

Broyeur	Degré d'humidité				
	12 %	13 %	15 %	17 %	19 %
	Puissance nécessaire (kW)				
A	–	7,4	10,1	11,6	11,0
B	24,4	–	28,0	30,6	33,6

Remarque : Les deux broyeurs traitent de l'orge. Le débit d'opération du broyeur A est de 279 kg/h et celui du broyeur B, de 1 092 kg/h. Source : Thomas, 1958.

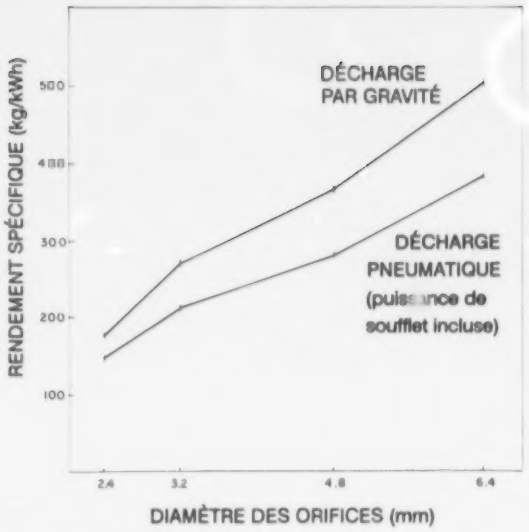


Fig. 15 Décharge pneumatique et par gravité de particules de maïs selon le degré d'humidité des grains. Source : Canadian Feed Manufacturers Technology.

Tableau 6 Rapport entre le rendement spécifique et le degré d'humidité du blé pour un broyeur équipé d'une passe de 3 mm

Degré d'humidité (%)	Rendement spécifique (kg/kWh)
13	66,0
15	56,6
17	48,7
19	40,8

Source : Summerfield, 1984.

2.9 *Alimentation* L'alimentation des broyeurs à marteaux se fait par force ou par gravité. Les deux méthodes visent à remplir entièrement la chambre de broyage et à admettre uniformément les grains.

Il faut toujours surveiller le rythme d'alimentation, sans jamais surcharger le broyeur. L'appareil est plein lorsque son ampèremètre indique que le moteur fonctionne à l'ampérage recommandé.

Dans la plupart des cas, l'admission des produits se fait manuellement par l'intermédiaire d'une goulotte munie d'une vanne à glissières. Ce système fonctionne bien lorsque les produits tombent librement et ne renferment aucune matière étrangère comme de la paille. Dans le cas contraire, le rythme d'alimentation est irrégulier et la goulotte se bloque. Pour prévenir ces difficultés, on peut ralentir l'alimentation, mais le broyeur est alors sous-utilisé.

Pour bien conjuguer l'alimentation et la capacité de broyage de l'appareil, on peut recourir à un régulateur d'admission. La goulotte de la trémie doit être aussi large que l'ouverture de la chambre de broyage pour que les grains s'y éparpillent uniformément. Un tel dispositif permet à l'utilisateur de régler l'alimentation de manière à ce que la charge soit constante, évitant ainsi le pompage, source de colmatage.

Le régulateur d'admission est actionné, soit par le moteur du broyeur au moyen d'une transmission à vitesse variable, soit par un moteur autonome à vitesse variable. La deuxième technique permet de synchroniser les moteurs du broyeur et du régulateur, de manière à ce que l'admission soit automatiquement interrompue lorsque la chambre de broyage est pleine, puis reprise au fil de la décharge des particules. La reprise est alors commandée par une diminution de l'intensité de courant affichée par l'ampèremètre.

Un siphon améliore le rendement du régulateur d'admission. Le siphon élimine les corps étrangers lourds et non métalliques des produits à broyer. Lorsqu'ils circulent dans la chambre de broyage, ces objets peuvent endommager les marteaux et la passe.

Pour empêcher les objets métalliques de s'introduire dans la chambre de broyage, il faut exposer tous les produits à un aimant avant qu'ils n'atteignent l'ouverture du tambour. Un déflecteur installé tout juste avant l'aimant aura pour effet de ralentir les produits et d'assurer l'interception de tous les objets ferreux. Pour un bon rendement, il faut débarrasser régulièrement l'aimant. Encombré d'objets métalliques, l'aimant n'est plus aussi efficace. Les objets métalliques qui tombent dans la chambre de broyage endommagent l'appareil et en accélèrent l'usure. Ils peuvent aussi gêner l'admission des matières premières.

2.10 *Transport des produits finis* Les broyeurs à marteaux sont équipés d'un système de décharge pneumatique ou par gravité. Les systèmes par gravité sont autonomes tandis que les systèmes pneumatiques peuvent influer sur le broyage. On peut subdiviser comme suit les deux techniques :

- décharge par gravité dans un silo
- décharge pneumatique par gravité
- décharge mécanique par gravité
- décharge pneumatique avec soufflerie accouplée au broyeur
- décharge pneumatique avec soufflerie autonome

Il faut éviter la décharge par gravité des produits chauffés directement dans un silo. Cette méthode constitue un risque constant d'incendie. Le transport des produits sur une certaine distance leur permet de tiédir. La décharge directe dans un silo commande aussi d'installer le broyeur sur un étage supérieur ou une plate-forme, ce qui gêne la surveillance du système. Avec les silos de matières premières nécessairement logés au-dessus du broyeur, l'installation occupe beaucoup d'espace vertical. Par ailleurs, la décharge par gravité laisse entrer l'air par la trémie d'alimentation du broyeur, si bien que les poussières peuvent gêner le fonctionnement du système aux niveaux inférieurs.

Les solutions de rechange à l'évacuation directe dans un silo comprennent :

- la décharge dans un transporteur pneumatique à pression positive et à écluse d'air rotative
- la décharge dans un transporteur pneumatique à pression négative et à prise d'air libre
- la décharge dans un transporteur mécanique

Les transporteurs pneumatiques consomment environ quatre fois plus d'énergie que les transporteurs mécaniques à vis ou à raclettes et les élévateurs à godets. La puissance nécessaire pour manoeuvrer le système pneumatique peut correspondre au tiers de la puissance requise pour le broyage. La figure 16 compare le rendement spécifique d'un broyeur avec décharge par gravité à celui d'un broyeur avec décharge pneumatique.

Tous les appareils de décharge et de transport pneumatique ont besoin de systèmes de dépoussiérage pour enlever l'air des produits finis avant de les déposer dans les silos. La publication 1832/F d'Agriculture Canada, *Appareils de déplacement d'air et transporteurs pneumatiques*, approfondit la matière.

Dans les broyeurs à marteaux, 50 % au moins de l'air requis pour le transport circule directement dans l'appareil avec les produits agricoles.

Pour les moutures fines et pour broyer les plantes fourragères et les grains de mouture difficile, l'air doit circuler dans la passe pour prévenir le colmatage. La décharge pneumatique contribue alors au rendement du broyeur, en plus d'assurer le transport des produits finis. Pour les moutures aux particules inférieures à 2,8 mm, il faut choisir la décharge pneumatique par aspiration. L'évacuation par gravité et l'évacuation pneumatique conviennent toutes deux pour les moutures grossières et les produits faciles à broyer.

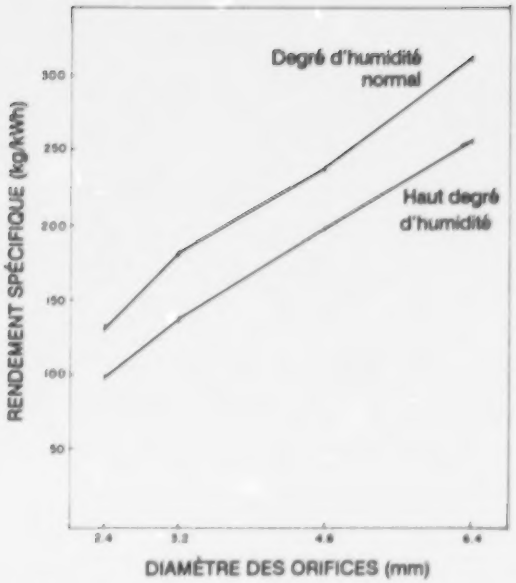


Fig. 16 Rendement spécifique d'un broyeur selon la décharge pneumatique ou par gravité. Source : Canadian Feed Manufacturers Technology.

La disposition des lieux et le type de mouture déterminent habituellement la technique de décharge et le choix du système de transport.

La figure 17 montre trois méthodes de décharge et de transport des produits triturés dans un broyeur à marteaux :

- décharge pneumatique
- décharge par gravité et transport mécanique
- décharge par gravité et transport pneumatique

2.11 *Lutte contre la poussière* Les opérations de mouture produisent beaucoup de poussières dont la récupération est justifiée par :

- des raisons d'hygiène et de santé
- l'observation des règlements sur la pollution
- l'utilisation à des fins alimentaires

L'entreprise qui produit 2 000 t de moulée par année et qui perd 5 % des particules en poussières accuse une perte annuelle de 100 t de moulée.

Il faut bien réfléchir aux conséquences économiques d'une décision qui rejette l'ajout d'un dispositif de filtration et de récupération des poussières dans un broyeur à marteaux.

2.12 *Installation, entretien et sécurité* Il faut installer le broyeur à marteaux sur un plancher ou une plate-forme à niveau et l'asseoir sur des coussins de montage en caoutchouc ou en composé de néoprène pour

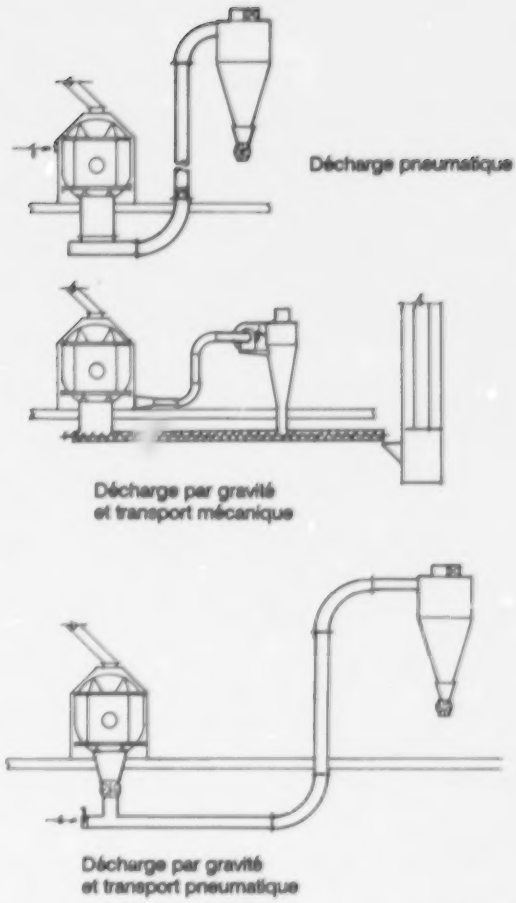


Fig. 17 Techniques de décharge et de transport des produits finis pour un broyeur à marteaux.

l'isoler de la structure environnante. Une telle installation prolonge la durée des paliers et amortit les bruits. Il faut aussi ajuster des joints en caoutchouc souple ou en silicone aux points de raccordement du broyage avec les autres composantes du système. Ces joints (fig. 18) préviennent le bris des soudures et la fissuration du métal, résultant des vibrations du broyeur.

Aux fins de sécurité, on intègre un dispositif d'arrêt automatique, relié aux portes du broyeur. Ce micro-interrupteur, capable de détecter l'ouverture des portes, empêche le démarrage du broyeur lorsqu'une porte n'est pas bien fermée et coupe le courant dès qu'une porte s'ouvre en cours de broyage.

Pour les appareils utilisés pendant un certain temps sans surveillance, il faut aussi prévoir un détecteur de vibrations, capable de couper automatiquement le courant lorsque celles-ci

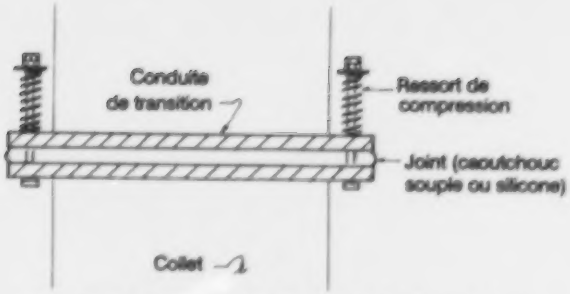


Fig. 18 Schéma du point d'union de deux conduites.

dépassent les normes. On recommande aussi un ampèremètre synchronisé au démarreur magnétique, capable de couper le courant en cas de surcharge. Un signal d'alarme, intégré au circuit, avertira l'utilisateur des dangers. Des thermistances dans l'enroulement du moteur couperont automatiquement le courant dès qu'il y aura surchauffage d'une composante du système.

L'entretien du broyeur à marteaux devrait comprendre l'inspection régulière de toutes les pièces sensibles à l'usure. Il faut observer soigneusement le calendrier de lubrification.

La plupart des broyeurs comportent des plaques d'usure internes qui déterminent le parcours des produits ou qui retiennent diverses composantes de l'appareil. Il faut vérifier les vannes d'alimentation et les remplacer s'il y a lieu. Nombre de broyeurs comportent aussi des plaques qui retiennent la passe dans la chambre de broyage. Lorsque ces plaques sont usées, la passe se rapproche des marteaux au point d'être frappée. Dans un tel cas, c'est tout le broyeur qui peut subir des dommages.

Les marteaux s'usent vite et il faut les remplacer régulièrement. Pour prévenir l'usure inégale des marteaux, on ajuste le dispositif d'admission des produits de manière à ce qu'ils s'écoulent également sur toute la largeur des marteaux. Il faut remplacer plutôt que retourner les marteaux usés sur un côté. Un marteau fatigué peut se détacher, endommager le broyeur et, peut-être, causer des accidents avec blessure. On vérifie l'usure des marteaux et l'élargissement des trous de goupille. Lorsque le jeu du marteau sur la goupille excède 1,6 mm vers l'arbre du rotor, on remplace immédiatement le marteau ou la goupille.

Une passe usée montre des orifices arrondis. Beaucoup d'utilisateurs considèrent que la passe est usée lorsque l'ampérage du moteur dépasse la normale par plus de 10 % pour une production donnée.

En règle générale, les vibrations excessives d'un broyeur à marteaux sont causées par l'une des cinq conditions suivantes :

- mauvaise disposition des marteaux
- marteaux brisés ou manquants
- marteaux trop usés
- jeu excessif des marteaux sur les goupilles
- tension excessive des marteaux

En faisant tourner le broyeur sans marteaux, on peut savoir si le mauvais fonctionnement vient du rotor ou des marteaux. On vérifie aussi l'usure ou la fissuration du rotor pour le remplacer, s'il y a lieu. Il faut remplacer les paliers bruyants au plus tôt. En cas de surchauffage, on vérifie la lubrification des paliers pour les remplacer, s'il y a lieu. Le surchauffage des paliers est responsable d'une bonne part des incendies et explosions dans les broyeurs. Il faut installer un dispositif d'intervention en cas de surchauffage lorsque le broyeur fonctionne sans surveillance.

2.13 *Choix du broyeur* Le facteur déterminant dans le choix du broyeur à marteaux est son débit, exprimé en tonne/heure. Comme guide, on compare le débit et les besoins hebdomadaires de moulée. Ensuite, on fait la liste de tous les fabricants qui vendent des broyeurs capables de satisfaire ces besoins, puis on choisit l'appareil en fonction de sa durabilité et de ses caractéristiques (facilité de remplacement de la passe, facilité d'entretien et de remplacement des marteaux). Dans la mesure où tous les fabricants observent les principes fondamentaux de fonctionnement, toutes les marques de broyeurs à marteaux donnent de bons résultats.

2.14 Rouleuses à grains

Les rouleuses à grains sont des appareils de trituration des matières premières. Elles donnent des moulées de finesse réglée, en produisant moins de poussières que les autres appareils de trituration. Plutôt que de briser complètement les grains, comme le font les broyeurs à marteaux, les rouleuses coupent la pellicule (albumen) des grains pour en exposer les parties intérieures. Les rouleuses peuvent traiter presque tous les types de grains.

Les notions de concassage, granulation, crêpage et fabrication de flocons décrivent habituellement le travail des rouleuses à grains. Le concassage, la granulation et le broyage s'appliquent à la trituration des grains en particules. Le crêpage et la fabrication de flocons correspondent à l'aplatissage des particules. Les flocons sont plus aplatis que les particules crêpées, mais les produits doivent séjourner longtemps dans une boîte à vapeur pour amollir les grains avant le roulage. Les rouleuses à grains produisent des particules de texture tendre à rude, filtrées dans les passes 4 à 140 (tableau 1).

La texture particulière des particules et la faible consommation d'énergie sont les attributs des rouleuses à grains.

2.15 *Description et fonctionnement* Les rouleuses comportent une ou plus d'une paire de rouleaux disposés en parallèle. Les paires supplémentaires pour la fabrication des flocons ou pour une augmentation de débit s'ajoutent au-dessus de la paire originale. Dans une paire, les deux rouleaux ont le même diamètre. Les plus petits mesurent 150 mm de long et 150 mm de diamètre, tandis que les plus gros mesurent 1 320 mm de long et 710 mm de diamètre.

Le carter de la rouleuse doit être conçu de manière à ce qu'il soit facile de retirer les rouleaux pour refaçonner les cannelures. Malheureusement, pour la plupart des broyeurs, l'enlèvement des rouleaux est trop souvent laborieux, si bien qu'il vaut mieux disposer de deux rouleuses à cannelures différentes, s'il y a lieu.

Chaque paire compte un rouleau monté en position fixe et l'autre monté en position ajustable, pour obtenir le degré voulu de trituration ou d'aplatissement et pour compenser l'usure causée par le façonnage renouvelé des cannelures. Le rouleau ajustable est habituellement retenu par un déclencheur à ressort qui amortit les chocs avec les cailloux et morceaux de métal introduits malencontreusement dans l'appareil.

Un dispositif d'alimentation distribue les provendes uniformément sur toute la largeur des rouleaux. Des racloirs préviennent les accumulations dans les cannelures en cours de traitement des grains très humides ou soumis à la vapeur.

La figure 19 montre les composantes d'une rouleuse à grains. La figure 20 est une rouleuse industrielle vue de côté.

2.16 *Caractéristiques* Pour un produit donné, les facteurs déterminants du travail des rouleuses sont :

- le type de rouleaux
- les cannelures
- l'écartement des rouleaux

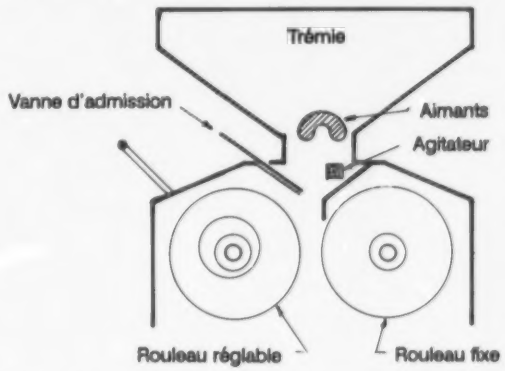


Fig. 19 Coupe transversale d'une rouleuse à grains.

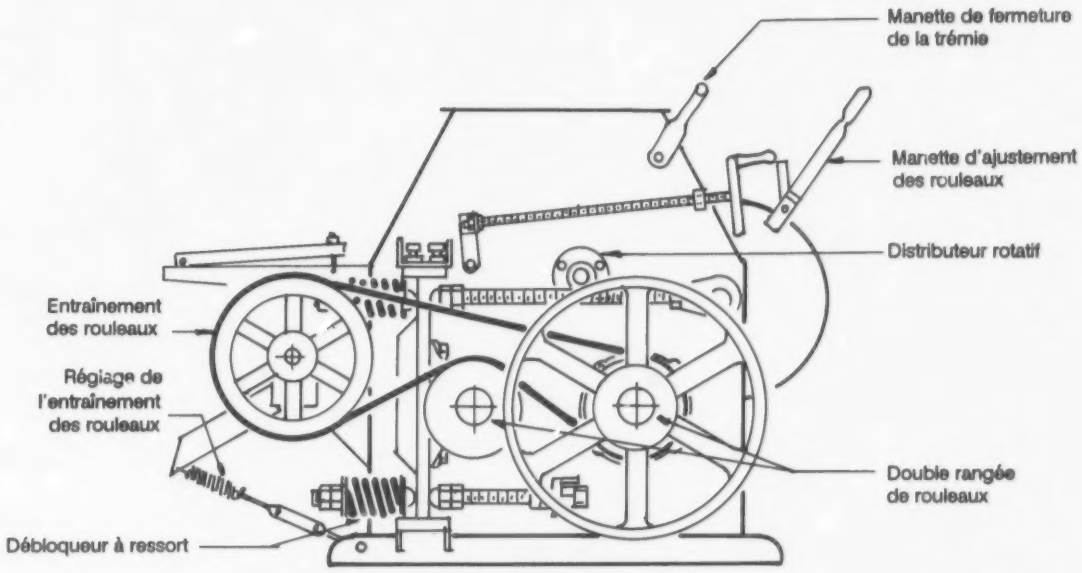


Fig. 20 Vue latérale d'une rouleuse industrielle. Source : Roskamp Manufacturing, Inc.

- la vitesse de rotation, notamment l'écart de vitesse entre chaque rouleau

2.17 *Rouleaux* Les rouleaux comptent pour le tiers ou la moitié du prix d'achat de la plupart des rouleuses à grains. Par conséquent, leur qualité doit correspondre à l'utilisation prévue. Il faut choisir des rouleaux dont l'indice de dureté varie entre 45 et 55 sur l'échelle Rockwell C.

Les rouleaux couramment utilisés sont :

- des cylindres creux en fonte ou en acier
- des rouleaux en alliage de fer blanc et d'acier, pleins jusqu'à l'arbre
- des rouleaux en fonte trempée, pleins ou partiellement creux

Les cylindres creux sont conçus pour les agriculteurs. Ils coûtent moins cher que les autres rouleaux, mais risquent davantage de se casser. En règle générale, les cylindres creux sont traités thermiquement par trempe de surface, après le façonnage des cannelures. Les caractéristiques dimensionnelles des cylindres creux peuvent varier considérablement, source d'un broyage inégal et de nombreuses vibrations. Par ailleurs, le refaçonnage des cannelures est limité.

Les rouleaux en alliage de fer blanc et d'acier sont coulés autour de l'arbre et entièrement pleins. Leurs cannelures sont façonnées après trempage au moyen d'outils spéciaux à pointe de carbure. On peut refaire les cannelures au moins 15 fois, les facteurs déterminants étant l'usure et la dimension des cannelures ainsi que la diminution possible du diamètre sans perte d'efficacité. Les appareils équipés de rouleaux monoblocs donnent des résultats plus uniformes et produisent moins de vibrations et de coups.

Les rouleaux en fonte trempée sont les meilleurs et les plus chers. En règle générale, on réserve cette technique de fabrication pour les rouleaux au diamètre égal ou supérieur à 300 mm. Les rouleaux sont trempés sur une profondeur d'environ 16 mm et peuvent supporter 10 fois le refaçonnage des cannelures.

Avec une paire de rouleaux robustes et de bonne qualité, on peut traiter entre 15 000 et 18 000 t de grains avant de refaire les cannelures. L'émoussement des cannelures provoque une consommation d'énergie accrue et une qualité de mouture moindre. Il faut toujours refaire les cannelures par couple de rouleaux.

2.18 *Cannelures* Les cannelures des rouleaux déterminent les propriétés des produits finis. Les grosses cannelures ont un effet de coupe et de hachage tandis que les petites cannelures aplatissent davantage les grains. Les grosses cannelures commandent de moins grands besoins d'énergie étant donné que la rouleuse écrase moins les grains. L'usure des rouleaux affecte l'efficacité des cannelures, augmente le volume des flocons et diminue le débit de la rouleuse. Le tableau 7 compare le débit d'une rouleuse en fonction des cannelures, des dimensions des rouleaux et de la force motrice.

Les différents rouleaux portent un nombre précis de cannelures par 25,4 mm de circonférence (cannelures au pouce) : entre 4,5 et 30. Certains gros rouleaux (diamètre de 300 mm) n'ont aucune cannelure. Plus le nombre de cannelures est élevé, plus les rouleaux doivent être gros pour laisser passer les grains selon une pression donnée.

Pour les grains au degré d'humidité inférieur à 15 % (roulage à sec), on utilise des rouleaux portant entre 4,5 et 6 cannelures par 24,5 mm et on obtient ainsi un concassage grossier qui satisfait les besoins du bétail et de la volaille. Pour concasser les grains de sorgho, on utilise plutôt des rouleaux portant 10 à 13 cannelures par 25,4 mm. Les rouleaux qui comptent 13 à 18 cannelures par 25,4 mm crêpent l'orge, l'avoine et le blé. Pour le roulage à la vapeur du maïs et des autres grains, on utilise respectivement des rouleaux de 16 et de 18 à 22 cannelures par 25,4 mm.

Tableau 7 Débit d'une rouleuse à grains en fonction des cannelures, des dimensions des rouleaux et de la force motrice

Dimensions des rouleaux (po)	Nombre de cannelures (par 25,4 mm)	Force motrice (kW)	Débit (t/h)	
			Maïs	Avoine, blé ou orge
	Roulage à sec (produits grossiers)			
9 × 30	5,5	15	27	–
9 × 30	11	15	18	6
9 × 30	15	15	13	4
12 × 30	16	18,6	14	5
16 × 30	18	22,4	22	6
	Roulage à la vapeur (flocons aplatis)			
12 × 30	18	18,6	2	4
16 × 30	18	30	4	5
16 × 36	18	37,3	5	7
18 × 36	18	45	7	9

Source : Larson, 1978*b*.

La rouleuse à deux paires de rouleaux est l'appareil tout désigné pour traiter à la fois le maïs et les petits grains (fig. 21). Les rouleaux du haut portent 5 cannelures par 25,4 mm, ceux du bas 14 ou 15 cannelures par 25,4 mm. Cette rouleuse traite efficacement la plupart des types de grains. La rouleuse à une paire de rouleaux qui a 18 cannelures par 25,4 mm est un autre appareil polyvalent.

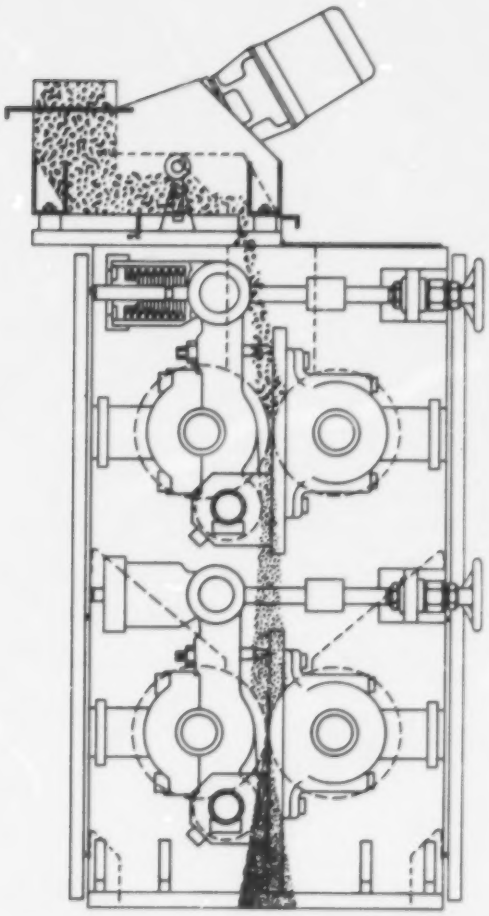


Fig. 21 Fonctionnement interne d'une rouleuse à deux couples de rouleaux.
Source : Gebr. Bauermeister and Co.

Les rouleaux à cannelures horizontales légèrement obliques (jeu de 12 à 25 mm d'un bout à l'autre) constitue une amélioration technique subtile. Leur mouvement en ciseaux adoucit l'action de la rouleuse. Pour couper les produits en dés, on installe un rouleau à cannelures horizontales et l'autre à cannelures circulaires (fig. 22).

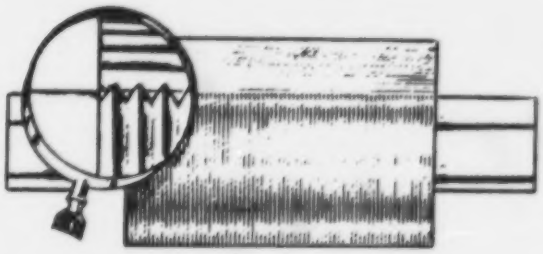


Fig. 22 Cannelures pour le découpage en dés.
Source : Koppers Co., Inc.

On trouve aussi des rouleaux qui portent 2 à 4 cannelures par 25,4 mm, profondes seulement de 1,5 mm, pour la production de flocons lisses. Encore là, ces rouleaux retiennent les grains.

La plupart des meuneries ont fixé l'écartement et la sorte de cannelures des rouleaux.

2.19 *Écartement* On peut facilement ajuster l'écartement des rouleaux. Plus les rouleaux sont rapprochés, plus la mouture est fine et plus le débit diminue.

2.20 *Vitesse de rotation* Lorsqu'ils tournent à vitesse égale, les rouleaux écrasent les grains. À vitesses différentes, ils exercent aussi une fonction de cisaillement. En changeant le diamètre relatif des poulies à cercle primitif variable, on modifie le jeu de vitesse des rouleaux. Les figures 23 à 26 illustrent les conséquences des modifications apportées à l'écartement et au jeu de vitesse des rouleaux. Les données proviennent d'études réalisées par Reece et Lott en 1985, avec une rouleuse à deux couples superposés, équipée surtout pour le traitement du maïs, mais capable de traiter les grins de sorgho et de blé.

La figure 23 montre les rapports du jeu de vitesse et du débit avec l'écartement des rouleaux du bas d'une rouleuse à deux couples. Le rythme de broyage augmente considérablement à mesure que s'écartent davantage les rouleaux du bas. Le broyage augmente au même rythme que le jeu de vitesse des rouleaux du haut. En diminuant la vitesse des rouleaux du bas, on augmente le débit.

La figure 24 montre l'incidence du jeu de vitesse des rouleaux sur le volume de particules de différentes tailles et sur leur diamètre géométrique moyen. En augmentant l'écart de vitesse, on diminue de peu le volume des particules inférieures à 1 200 µm et on augmente de peu le volume des particules supérieures à 1 200 µm. Le diamètre géométrique moyen passe de 1 393 à 1 583 µm.

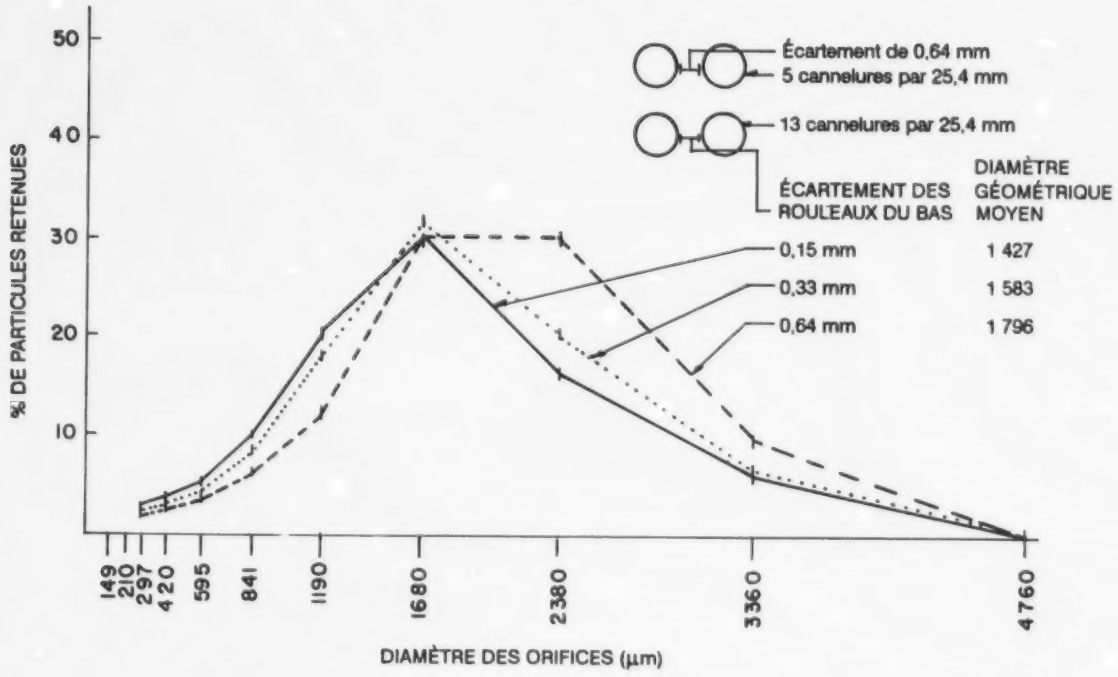


Fig. 23 Débit d'opération d'une rouleuse à grains de maïs selon l'écartement et le jeu de vitesse des rouleaux (Reece et Lott 1985).

La figure 25 montre qu'un écart de vitesse considérable entre les deux rouleaux du haut, puis entre les couples du haut et du bas produit moins de poussières et de particules poudreuses, qui conviennent guère aux moulées pour le cheptel.

La figure 26 montre que l'écartement plus grand des rouleaux du bas a entraîné une

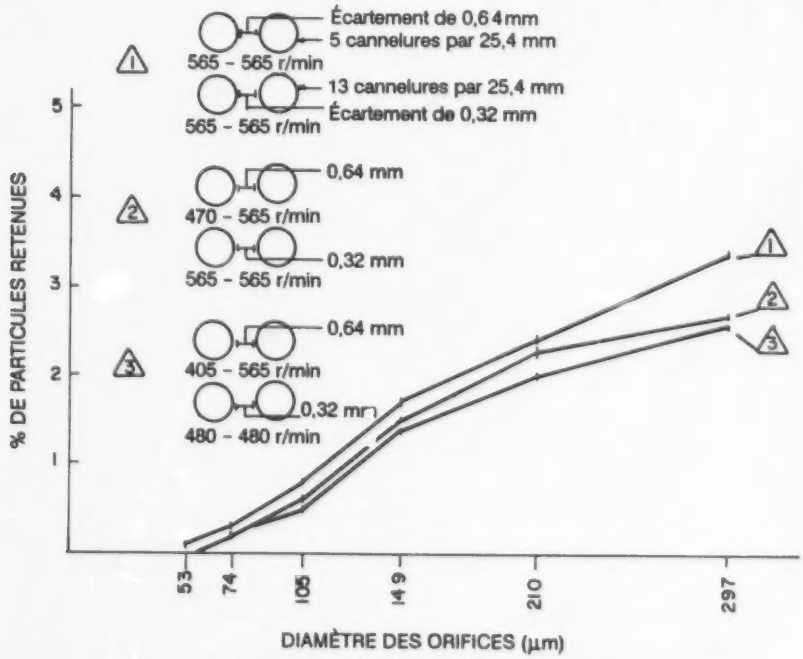


Fig. 24 Taille des particules de maïs selon le jeu de vitesse des rouleaux (Reece et Lott, 1985).

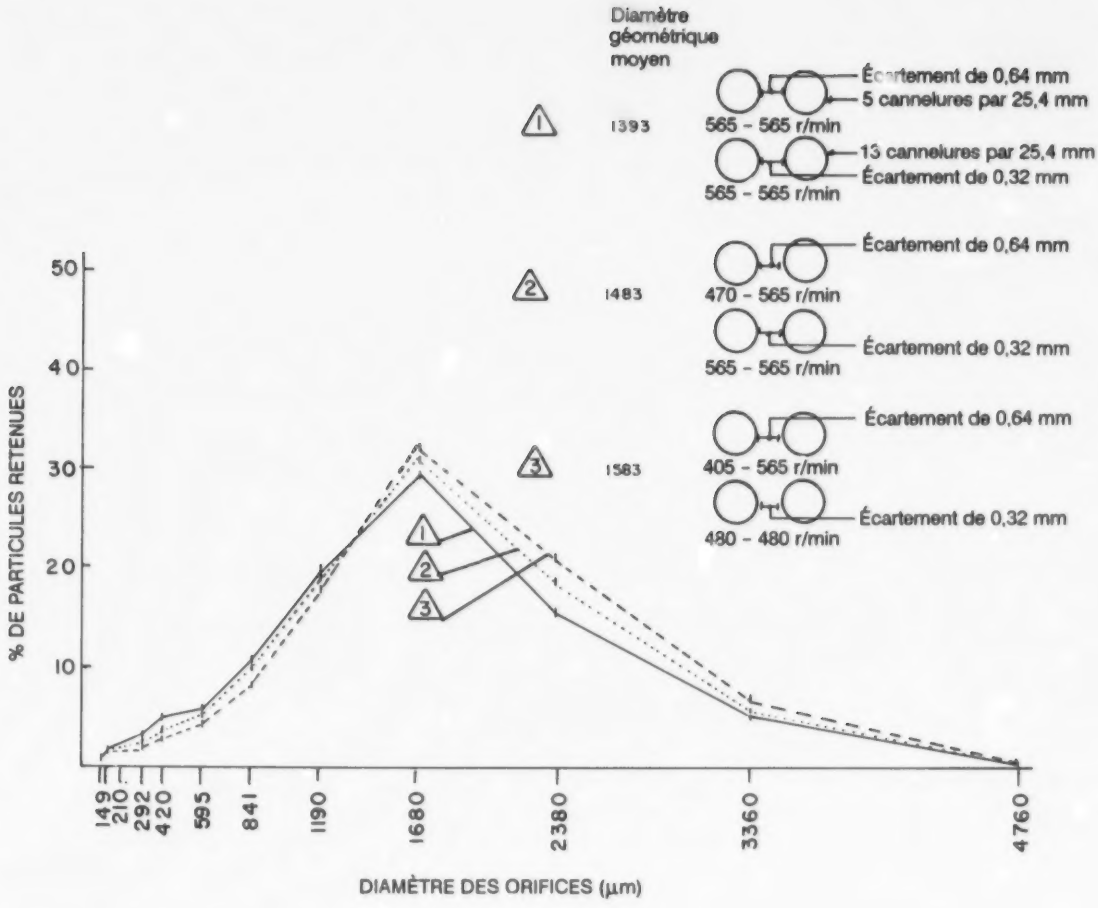


Fig. 25 Particules de maïs retenues selon le jeu de vitesse des rouleaux (Reece and Lott 1935).

augmentation du volume des particules de 2 380 et 3 360 micromètres.

En augmentant la vitesse de rotation des rouleaux, on augmente aussi le débit, au détriment de la résistance des cannelures et de la rouleuse. Néanmoins les rouleaux de petit diamètre doivent tourner rapidement, étant donné que la vitesse de surface baisse à mesure que le diamètre diminue.

Les vitesses de rotation des rouleaux couramment utilisés au Canada sont les suivantes :

Diamètre des rouleaux (mm)	Vitesse de rotation (m/min)
230	370
300	430
410	490
460	520
510	550
610	550

Les rouleaux de 610 mm de diamètre tournent à faible vitesse parce qu'ils sont habituellement unis. Les gros rouleaux tournent plus vite parce qu'ils ont une ligne de contact plus grande.

2.21 *Alimentation* Le dispositif d'alimentation de la rouleuse doit éparpiller les produits sur toute la longueur des rouleaux et empêcher les corps étrangers d'atteindre la chambre de broyage. L'admission régulière des grains assure leur trituration uniforme et le débit optimal de la rouleuse. Étant donné le peu d'espace libre entre les rouleaux, les corps étrangers causent particulièrement des dommages.

Pour contrôler le rythme d'admission des grains, on utilise une vanne à glissières ou un dispositif d'alimentation. Parce qu'elles sont simples et peu coûteuses, les producteurs utilisent surtout les vannes à glissières. Cependant, elles n'assurent pas la constance de l'alimentation. Un rythme inégal d'admission peut causer l'engorgement ou un rythme d'admission trop faible des produits.

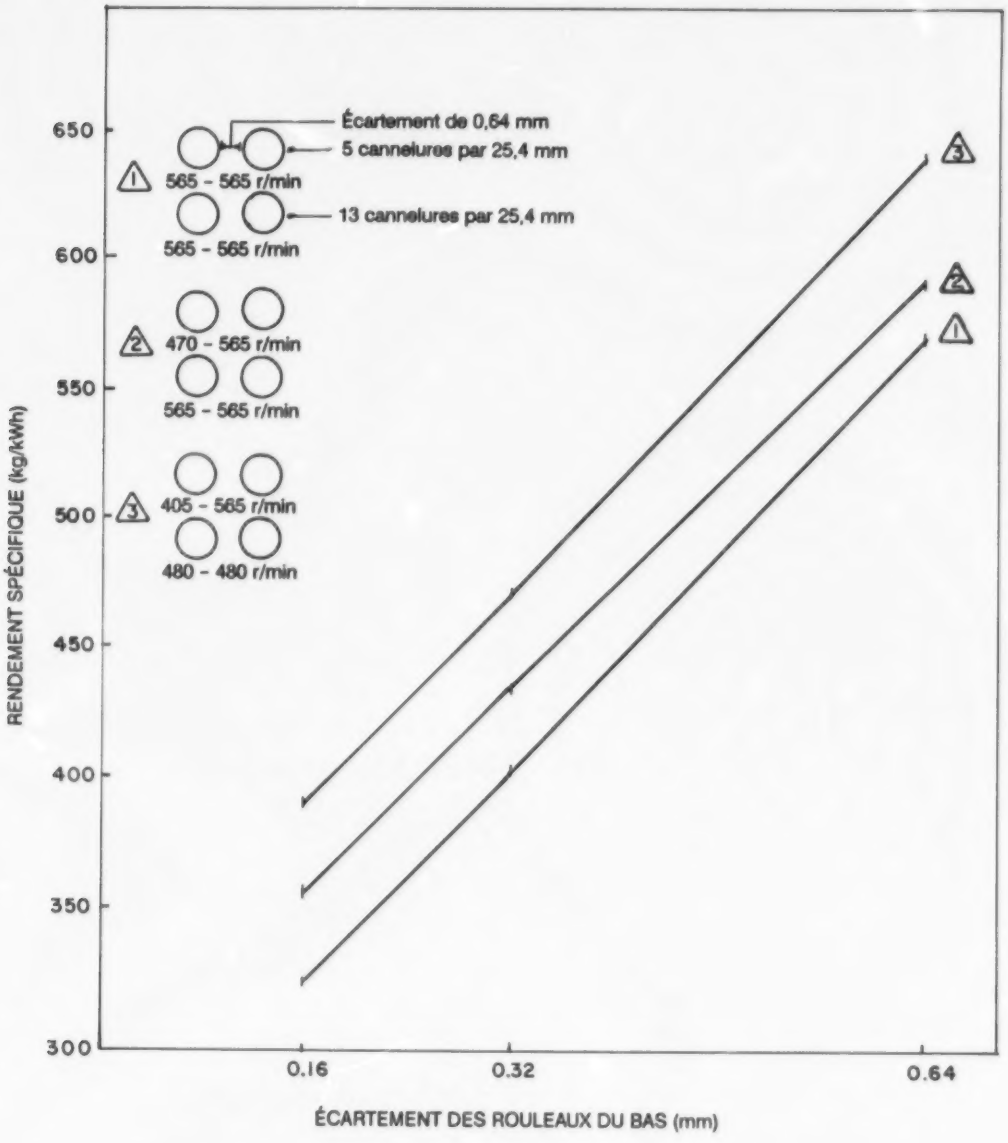


Fig. 26 Taille des particules de maïs selon l'écartement des rouleaux du bas (Reece and Lott 1985).

Les dispositifs d'alimentation, comme un distributeur rotatif ou à vis, permettent aux utilisateurs de régler l'admission des produits pour obtenir un débit optimal. Le plateau vibrant est un dispositif courant, qui comporte une écluse réglable le long du sabot, pour bien équilibrer l'écoulement des produits. Un système d'entraînement excentrique, accouplé à un rouleau, assure le fonctionnement du distributeur par l'intermédiaire d'une manette. La rouleuse à deux couples de la figure 21 est équipée d'un tel dispositif.

La figure 27 montre un dispositif d'alimentation en maïs–épis, soit un moulinet déchiqueteur, couvrant toute la longueur des rouleaux, qui triture préalablement les produits avant d'alimenter la rouleuse. Une passe filtre les particules à rouler et empêche ainsi que des corps étrangers entrent dans la rouleuse.

De même, on utilise couramment un dispositif d'alimentation à cylindres, dont le débit est contrôlé par une vanne, ainsi qu'un dispositif à goupille, utile pour les produits à haut taux d'humidité.

Les rouleuses à grains sont des appareils très robustes. Les rouleaux hydrauliques ou à ressort laissent passer les produits plus gros que normal. Néanmoins, les corps étrangers

qui s'introduisent dans la chambre de roulage peuvent accélérer l'usure des appareils et briser les arbres, les paliers et les rouleaux. Il faut intercepter les corps étrangers.

La solution idéale consiste à soumettre tous les produits à un cribleur, qui protège toutes les composantes de transport et de traitement contre les corps étrangers.

Pour le roulage à sec, la plupart des fabricants offrent un cribleur vibrant intégré à une passe. Ce cribleur nettoie les grains en plus d'alimenter la rouleuse. La passe doit laisser s'écouler les grains à rouler et écarter les corps étrangers. Il faut aussi prévoir un aspirateur qui élimine les poussières produites par le cribleur. Le rendement des cribleurs intégrés joue entre 3 et 4 t/h. Pour un rendement supérieur, il faut disposer d'un appareil distinct de nettoyage.

Le cribleur ne convient pas au roulage à la vapeur à cause de la chambre de conditionnement. Pourtant, le roulage à la vapeur commande un nettoyage plus complet

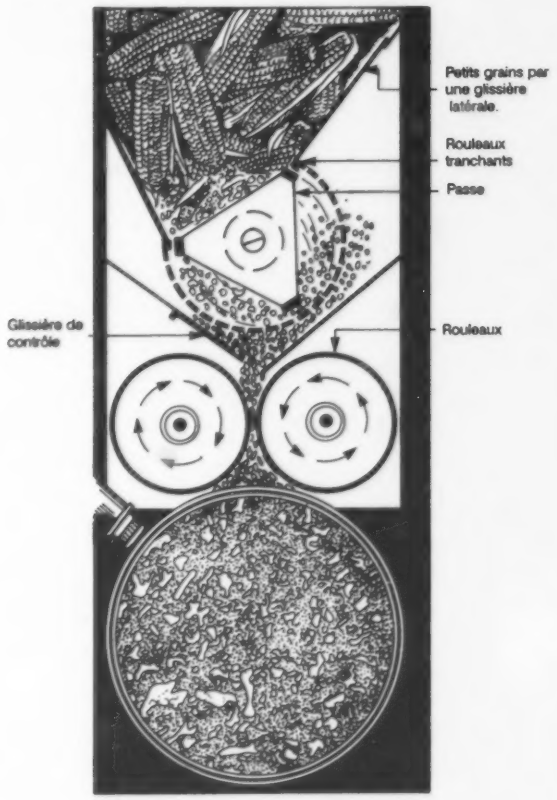


Fig. 27 Dispositif d'alimentation en maïs-épis.

pour bien éliminer les corps étrangers et les poussières. Celles-ci se mélangent, en effet, à l'humidité de la chambre à vapeur pour former un schlamm vaseux qui s'accumule sur les rouleaux, affectant ainsi leur efficacité. Il faut utiliser un dispositif à double passe, muni d'un aspirateur, pour nettoyer les produits avant leur admission dans la chambre à vapeur.

En guise de deuxième dispositif d'interception des corps étrangers, il faut installer un aimant qui retiendra les objets métalliques, tout juste avant la chambre de roulage, en un endroit facile d'accès pour en assurer l'entretien. On installe aussi d'autres aimants dans une passe de la trémie d'alimentation, dans les cribleurs intégrés et dans le distributeur.

La trituration en flocons des grains soumis à la vapeur suscite des hausses de pression qui peuvent exercer une force atteignant 90 kN sur les paliers. Les charges d'impact des cailloux sont encore plus intenses et dommageables. Les rouleaux hydrauliques supportent mieux les charges d'impact que les rouleaux à ressort, mais restent néanmoins fragiles aux bris et à l'usure précoce.

Pour les rouleaux à ressort, on utilise des clavettes de rupture, capables de céder et de libérer les rouleaux lorsque des corps étrangers s'introduisent dans l'appareil. Il suffit ensuite de remplacer la clavette cassée. Pour les rouleaux hydrauliques, on utilise un accumulateur capable d'absorber les charges d'impact. Des cylindres de rétention des paliers servent alors de tampon pour transmettre les charges.

2.22 *Roulage à sec et émiettement* Le roulage à sec concasse les grains. Pour le maïs, on utilise des rouleaux de 5 cannelures par 25,4 mm et pour les petits grains, des rouleaux de 11 à 15 cannelures par 25,4 mm.

En règle générale, le roulage à sec se fait dans des appareils à deux couples. Le couple du haut est réglé pour concasser le mais et le couple du bas, pour concasser les petits grains. On peut triturer le maïs en particules de 1,6 mm en le passant une fois dans un appareil à deux couples.

L'émiettement se définit par la trituration des granulés en particules de 6,4 mm ou moins. L'émiettement permet de mélanger des moulées de différentes grosseurs, surtout pour la volaille et les porcs. Les rouleaux recommandés mesurent 910, 1 220 ou 1 520 mm de long et 150 ou 200 mm de diamètre. Les cannelures recommandées sont de type LePage

(fig. 26) à 10 par 25,4 mm sur le rouleau en dent de scie et à 8 par 25,4 mm sur le rouleau standard. Pour éviter la formation de poussières et pour préserver le fil des cannelures, on fait tourner les rouleaux lentement (entre 300 et 400 r/m). En gros volumes, les appareils à deux couples produisent moins de poussières que les appareils à un couple. Ce type de rouleuse donne aussi de bons résultats avec le maïs et les petits grains.

2.23 *Roulage humide* Le mouillage consiste à hausser le degré d'humidité des grains avant de les rouler. Pour ce faire, on ajoute de l'eau à un volume déterminé de grains dans un transporteur-mélangeur ou dans une chambre de mélange (fig. 28). Pour bien faire pénétrer l'eau, on conserve les grains dans un silo pendant 12 à 48 h. L'eau chaude accélère le rythme d'absorption.

Par mouillage, on peut augmenter de 20 à 22 % le degré d'humidité des grains. Le roulage donne alors des flocons de moulée à utiliser rapidement pour éviter qu'ils ne pourrissent. Plus les grains sont humides, plus ils sont spongieux. Un degré d'humidité supérieur à 30 % fait coller les grains aux rouleaux, même lorsque l'appareil est équipé de racloirs.

Le mouillage permet surtout de relever le degré d'humidité des grains trop secs. Cette intervention est source d'économie d'énergie en cours de roulage et diminue le volume de poussières. Par ailleurs, le bétail préfère les grains humides, plus savoureux et plus faciles à digérer.

2.24 *Roulage à la vapeur* La technique consiste à traiter les grains à la vapeur avant de les rouler. Le roulage à la vapeur jumelé à la fabrication de flocons élimine pratiquement les poussières et donne des produits savoureux et faciles à digérer. En allongeant le séjour des grains dans la chambre à vapeur et en rapprochant les rouleaux pour une pression plus forte, on améliore l'aplatissement et la qualité des flocons.

La figure 29 montre une chambre à vapeur industrielle, accouplée à une rouleuse à un couple.

Il faut s'assurer que la vapeur ne renferme pas de condensat. La vapeur à haute température et à haute pression se répartit mieux dans la chambre à vapeur pour une absorption plus uniforme et plus rapide par les grains. Cette technique a aussi pour effet de chauffer les grains avant le roulage.

Le tableau 8 fournit des données qui orientent le choix de la chaudière à adjoindre à la chambre à vapeur. On obtient les chiffres indiqués en calculant le volume d'eau requis

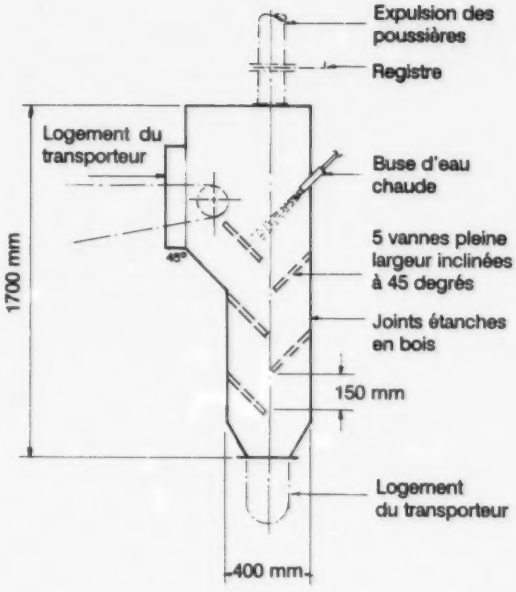


Fig. 28 Chambre de mélange humide.

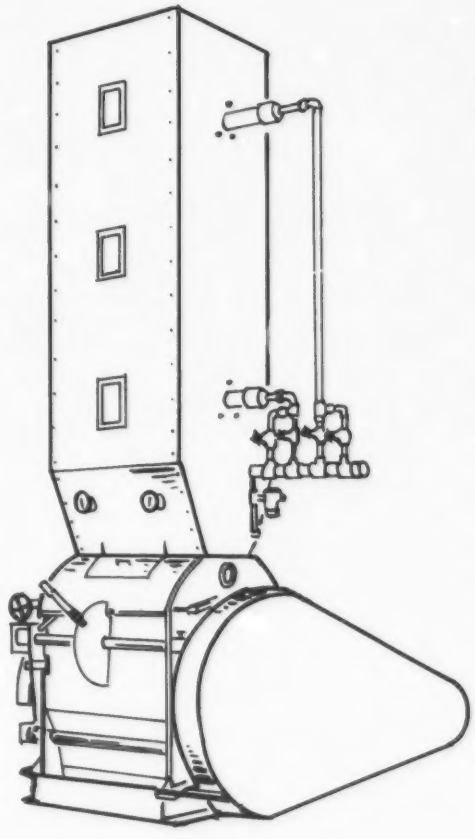


Fig. 29 Chambre à vapeur accouplée à une rouleuse à grains. Source : Roskamp Manufacturing, Inc.

Tableau 8 Données du roulage à la vapeur

Grains	Vapeur (kg/t)	Durée d'exposition à la vapeur (min)
Avoine	75	6–10
Orge	100	6–10
Blé	100	6–10
Maïs	150	12–20
Sorgho	150	20–30

Source : Larson, 1978.

pour hausser tel que prévu le degré d'humidité des produits. À titre d'exemple, pour une rouleuse traitant 7,25 t/h de produits, il faut prévoir 507 kg de vapeur pour hausser de 7 % le degré d'humidité, soit 70 kg/t. Un jeu de 30 à 50 % compense les pertes en lignes et les fuites de vapeur vive.

La formule suivante permet de calculer la vapeur requise (kg/h) pour la chaudière :

$$\begin{matrix}\text{vapeur} \\ \text{requise} \\ \text{(kg/t)}\end{matrix} \times \begin{matrix}\text{rouleuse} \\ \text{débit} \\ \text{(t/h)}\end{matrix} \times (1{,}3 \text{ à } 1{,}5)$$

Étant donné que les génératrices de vapeur fonctionnent souvent plus longtemps que nécessaire, il faut prévoir un dépassement de 20 % et l'ajouter à la puissance de la chaudière.

On calcule comme suit la puissance de la chaudière (kW) :

$$\frac{\text{vapeur requise (kg/h)} \times 1{,}2}{21}$$

Il faut disposer d'une chambre à vapeur de bonne dimension, calculée en fonction du volume correspondant au temps de séjour désiré. Lorsque les calculs commandent une chambre à vapeur exagérément haute, on augmente la surface de section transversale. La documentation des fournisseurs précise les surfaces courantes.

La durée de séjour n'est pas la même pour le roulage à la vapeur et la production de flocons à la vapeur. Pour le roulage, elle est de 10 min au plus. Pour la production de flocons, elle joue entre 15 et 25 minutes. Plus la durée de séjour est longue, plus les flocons sont aplatis. Pour la production de flocons, l'avoine et l'orge séjournent de 15 à 20 min dans la chambre à vapeur et le maïs et le sorgho, 20 à 25 minutes.

Le roulage à la vapeur augmente la température des produits traités, si bien qu'il faut les refroidir et les sécher pour ne pas les perdre. Pour ce faire, on utilise un silo d'aération jumelé à un refroidisseur plus petit et on ajoute de la chaleur pour compléter la chaleur sensible des produits et diminuer leur degré d'humidité.

L'installation de roulage à la vapeur doit comprendre un drain pour évacuer le condensat emprisonné dans le collecteur-distributeur de vapeur afin de prévenir la corrosion. L'installation doit aussi comprendre un ventilateur-aérateur pour évacuer, cette fois, la vapeur excédentaire de la chambre.

2.25 *Transport et stockage des produits roulés* Les problèmes les plus épineux, associés au transport et au stockage des produits roulés, sont le bris et la diminution de la température et du degré d'humidité. La gravité des problèmes dépend du genre de traitement.

Le transport des produits secs et roulés suscite peu de difficultés. La plupart des installations déchargent les produits par gravité dans un transporteur mécanique à vis ou un élévateur à godets. Les produits peuvent être stockés, mélangés ou distribués aux animaux.

Pour contrôler l'humidité et le bris des grains exposés à la vapeur et à un haut degré d'humidité, on utilise un refroidisseur-sécheur. Les grains passent directement de la rouleuse à cet appareil par gravité. Pour éviter le plus possible les bris, le transport vertical se fait au moyen d'un élévateur à godets à basse vitesse et le transport horizontal, au moyen d'un transporteur à courroie.

Sans refroidisseur-sécheur, le roulage à la vapeur commande plusieurs ajustements. Prioritairement, il faut donner les produits aux animaux le plus vite possible, pour éviter qu'ils ne pourrissent. Le stockage des produits chauds et humides cause la formation de ponts dans les cellules et la corrosion des parois. Dans une certaine mesure, une cellule à fond mobile et muni d'une soufflerie élimine ce genre de problèmes. Cependant, l'aération dans les cellules n'abaisse pas suffisamment la température des grains pour suppléer le refroidisseur-sécheur.

Le recours à un transporteur pneumatique élimine la vapeur excédentaire des produits traités à la vapeur, en plus de favoriser le nettoyage de la rouleuse et du milieu de travail. Même si le transporteur pneumatique produit une chute de température de 11 °C et une perte d'humidité de 1 %, l'utilisation d'un refroidisseur-sécheur s'impose toujours. Le transport pneumatique risque toutefois d'endommager la plupart des produits roulés, notamment le maïs et le sorgho.

2.26 *Installation et entretien* Il faut disposer d'un espace suffisant pour retirer les rouleaux dont les cannelures doivent être refaites. Il s'agit du facteur déterminant pour l'installation de la

rouleuse à grains. D'autres facteurs méritent aussi une attention particulière.

Pour faciliter l'inspection et l'entretien, on laisse au moins 600 mm d'espace libre sur les côtés de la rouleuse, montée sur des coussins en caoutchouc ou en néoprène, comparables à ceux du broyeur à marteaux. La chute des grains au milieu du cylindre ou du dispositif d'alimentation doit être droite, jamais à angle. Il faut prévoir un système de décharge des produits, au moins aussi rapide que le rythme de production. On situe le réservoir du compresseur et le tableau de commande à l'écart des rouleuses hydrauliques.

L'entretien d'une rouleuse à grains est relativement simple. Pour maintenir le bon fonctionnement de l'appareil, il faut lubrifier périodiquement toutes les pièces mobiles et vérifier l'état des diverses composantes. Ne pas laisser les poussières s'accumuler dans la rouleuse et dans son environnement immédiat. On vérifie l'usure des rouleaux et les ajustements de bout en bout, ainsi que l'usure des racloirs et la tension des fixations. Il faut aussi maintenir la tension des courroies d'entraînement.

Avant de lancer le moteur, on tourne les rouleaux à la main pour vérifier la liberté de mouvement de toutes les pièces mobiles. On profite aussi de l'occasion pour enlever les cailloux et les corps étrangers métalliques accumulés dans la trémie ou retenus par les aimants.

2.27 Analyse comparative des broyeurs à marteaux et des rouleuses

Pour un fort débit, les rouleuses à grains requièrent une force motrice moindre que les autres broyeurs. Les rouleuses donnent des produits plus homogènes et comportant moins de particules poudreuses.

Contrairement aux broyeurs à marteaux, les rouleuses ne conviennent pas aux exploitations qui traitent des mélanges composés de particules de différentes grosseurs. Les rouleuses sont plus fragiles aux dommages causés par les corps étrangers. Elles ne chauffent pas les produits autant que les broyeurs à marteaux.

Les broyeurs à marteaux, pour leur part, sont des appareils plus bruyants et exigeant davantage d'entretien que les rouleuses.

Le tableau 9 compare le rendement des deux types de broyeurs. Le broyeur à l'étude est muni d'une passe complète (quatre diamètres d'orifice) et son alimentation et sa décharge se font par gravité. La rouleuse comprend deux couples superposés pour laquelle on a défini trois écartements des rouleaux du bas et une vitesse de rotation. Pour les trois écartements, le débit de la rouleuse est supérieur au débit du broyeur équipé d'une passe de 4,8 mm. Même avec l'écartement le plus étroit, le diamètre géométrique moyen des particules est beaucoup plus gros avec la rouleuse.

Tableau 9 Rendement et diamètre géométrique moyen en fonction des orifices de la passe et de l'écartement des rouleaux

		Rendement (kg/kWh)	Diamètre géométrique moyen (µm)
Rouleuse à grains Écartement des rouleaux (mm)			
Couple du haut*	Couple du bas**		
0,635	0,160	391	1427
0,635	0,318	476	1583
0,635	0,635	644	1769
Broyeur à marteaux Orifices de la passe (mm)			
3,175		257	679
4,763		352	858
6,350		450	987
9,525		638	1287

* 5 cannelures par 25,4 mm, 405–565 r/min
** 13 cannelures par 25,4 mm, 485 r/min
Remarque : Les deux appareils fabriquent de la mouture de maïs pour des poulets de chair. Source : Reece et Lott, 1985.

Les rouleuses arrivent uniquement à crêper les grains et à en faire des flocons, par une technique à haute température et à haut degré d'humidité. Les rouleuses produisent des moulées faciles à digérer, moins poudreuses que les moulées tirées des autres méthodes de trituration.

Par ailleurs, pour obtenir une mouture fine et des particules poudreuses, l'utilisation de la rouleuse coûte cher. Le broyeur à marteaux est alors l'appareil à utiliser. Les broyeurs à marteaux peuvent traiter tous les grains, le maïs-épi, le foin et le fourrage grossier, tandis que les rouleuses ne donnent pas de bons résultats avec les produits fibreux.

3 MÉLANGE

3.1 Objet

Trois raisons justifient la préparation des mélanges :

- assurer la composition constante des rations
- augmenter l'ingestion des aliments en améliorant leur goût
- prévenir l'ingestion excessive des substances (comme les antibiotiques) ajoutées en petites quantités aux rations

Le mélange approprié est le seul gage de l'équilibre nutritif des rations. Plus la préparation est complexe, plus le mélange prend de l'importance. Le mélange approprié assure, pour chaque ration, la conformité avec les caractéristiques de la préparation originale. Le mélange assure aussi l'uniformité de l'alimentation pour tous les animaux d'un même groupe. Par ailleurs, certains animaux refusent d'ingérer des ingrédients, à moins qu'ils ne soient mélangés à d'autres ingrédients meilleurs au goût.

La connaissance des principes fondamentaux assure l'uniformité des mélanges. La volaille et les porcs, par exemple, ont un faible seuil de tolérance au déséquilibre des rations. Par conséquent, la préparation des moulées pour ces animaux commande de plus gros investissements que la préparation des moulées pour les bovins de boucherie. Les jeunes exigent un mélange plus précis que les animaux pleinement développés, étant donné qu'ils consomment de plus petites portions et qu'ils tolèrent mal les modifications apportées à leur régime alimentaire.

L'ordre d'incorporation des ingrédients et le temps de mélange jouent sur la séparation des produits. Les principaux ingrédients doivent précéder les ingrédients secondaires. Cette pratique diminue le temps de mélange requis pour obtenir une moulée homogène. Les mélangeurs présentent un temps de mélange optimal (entre 2 et 6 min) pour les différentes préparations. Pour une ration donnée, on prélève un échantillon chaque minute afin de déterminer le temps de mélange optimal de l'appareil. Un mélange trop court ou trop long donne des résultats irréguliers.

3.2 Théorie

Le coefficient de variation (C_v) est la mesure de l'efficacité du mélangeur. Le C_v indique la portée de l'écart entre les échantillons prélevés d'un mélange et la moyenne desdits échantillons. Pour un mélange parfait, le coefficient de variation est de zéro. Plus le C_v est bas, plus le mélange est homogène.

Pour calculer le coefficient de variation, on utilise l'équation suivante :

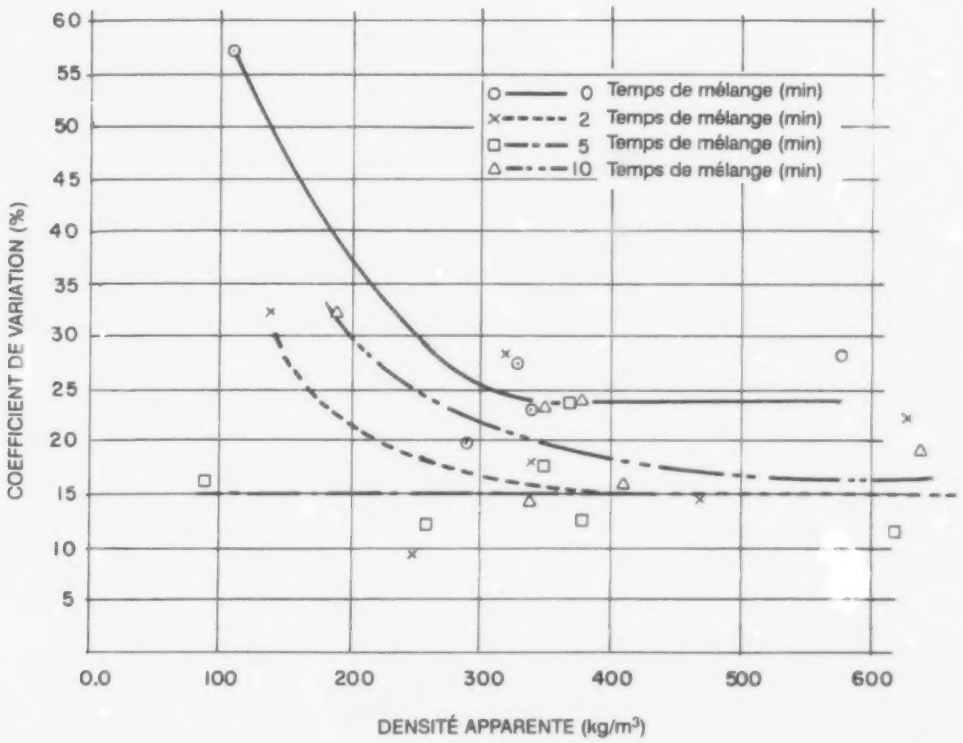


Fig. 30 Coefficient de variation et densité apparente pour un mélangeur vertical par lot (Lenton 1975).

$$C_v = (100\, s/\bar{x})$$

dans laquelle,

C_v = pourcentage de la moyenne des écarts

s = écart-type des échantillons, fondé sur la courbe des erreurs

$\bar{x}$ = valeur moyenne de tous les échantillons

Le coefficient de variation est un concept statistique qui décrit la probabilité d'appartenance d'un pourcentage donné d'échantillons à une fourchette précise de tolérance. Le C_v est le pourcentage de la moyenne qui est une déviation standard.

En abaissant le coefficient de variation d'un mélange, on augmente la probabilité de réalisation constante des objectifs d'alimentation. En règle générale, un C_v entre 5 et 10 % est tout à fait acceptable pour la plupart des animaux d'élevage et prévient la plupart des troubles nutritionnels. Pour les bovins, un coefficient de 15 à 20 % est satisfaisant, tandis qu'un coefficient de 30 à 50 % peut susciter des troubles. Pour les porcs et la volaille, les nutritionnistes considèrent qu'un C_v de 11 à 12 % est satisfaisant.

Parmi les facteurs qui influent sur la qualité des mélanges, il faut mentionner :

- la densité apparente
- la grosseur et la forme des particules
- le degré d'humidité
- le temps de mélange
- l'admission et la décharge des produits
- les agitateurs

3.3 *Densité apparente* La densité apparente des ingrédients courants varie entre 200 et 600 kg/m^3. En règle générale, les rations dont la densité apparente est supérieure à 380 kg/m^3 ont un coefficient de variation inférieur à celui des autres rations. C'est le cas pour la plupart des rations composées exclusivement de grains. Par contre, les rations mixtes de grains et de fourrage ont une densité apparente inférieure à 380 kg/m^3 Compte tenu de la diversité des ingrédients de différente densité, les rations de grains et de fourrage souffrent habituellement d'un défaut d'homogénéité. La figure 30 montre le rapport entre le coefficient de variation et la densité apparente pour un broyeur-mélangeur vertical.

3.4 *Grosseur et forme des produits* Les composantes des moulées peuvent différer considérablement quant à la grosseur et la forme, ce qui contribue à la séparation des produits. L'indice d'homogénéité décrit la proportion de particules grossières, moyennes et fines dans les rations. À titre d'exemple, une moulée de bonne qualité aura un indice de 3:4:3, soit 30 % de particules grossières, 40 % de particules moyennes et 30 % de particules fines. L'indice d'une ration comprenant de 30 à 40 % de foin et de paille sera de 3:5:2. Le tableau 10 compare le coefficient de variation et l'indice d'homogénéité des rations préparées dans un mélangeur vertical. Les moulées comprenant davantage de particules grossières sont moins homogènes que les moutures fines et leur coefficient de variation est plus élevé. Les particules grossières (comme la paille) laissent s'écouler les particules fines et denses, ce qui entraîne une répartition inégale des ingrédients supplémentaires des rations.

3.5 *Degré d'humidité* L'incidence du degré d'humidité sur le coefficient de variation est inconstant quand le degré d'humidité se situe dans la normale de 5 à 21 %. Certaines particules ont une plus grande capacité d'absorption ce qui modifie ainsi les données de densité et de friction et affecte le rendement du mélangeur.

3.6 *Temps de mélange* L'homogénéité des ingrédients joue sur le temps de mélange. Comme le montre la figure 31, pour une opération de mélange à 100 % de grains dans un appareil vertical, le C_v chute rapidement durant les premières minutes pour ensuite se stabiliser. Les résultats semblent démontrer que 2 à 5 min suffisent pour bien mélanger une ration de grains, soit pour obtenir un C_v d'environ 15 %. Le prolongement de l'opération de mélange améliore peu les rations et risque, au contraire, de séparer les particules de différentes grosseurs.

La figure 32 illustre, cette fois, une opération de mélange d'une préparation à 60 % de grains et à 40 % de foin, dans un broyeur-mélangeur

Tableau 10 Rapport entre l'indice d'homogénéité et le rendement d'un mélangeur vertical par lot

	Indice d'homogénéité	Coefficient de variation (%)
100 % de grains	1:5:4	17,5
	1:6:3	12,4
	0:6:4	11,4
Mélange à 60 % de grains et 40 % de foin	1:6:3	23,5
	2:5:3	16,0
	–	–

Remarque : Le temps de mélange est de 5 minutes.
Source : Lenton, 1975.

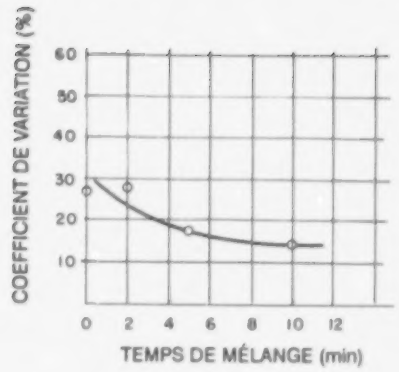


Fig. 31 Coefficient de variation et temps de mélange pour une ration à 100 % de grains (Lenton, 1975).

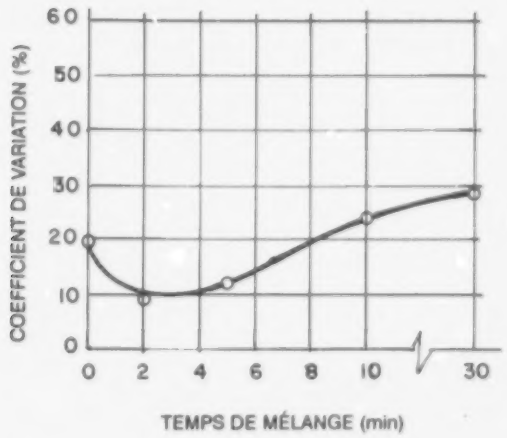


Fig. 32 Coefficient de variation et temps de mélange pour une ration à 60 % de grains et 40 % de foin (Lenton, 1975).

vertical. La courbe montre la chute rapide du C_v et sa remontée lorsque le temps de mélange s'étire. Dans le cas à l'étude, un temps de mélange de 2 à 5 min donne un C_v d'environ 20 %. La séparation des ingrédients survient après 10 min de mélange.

En mélangeant les grains et le foin, il faut s'assurer qu la formation de ponts n'affecte pas les supports de la vis de mélange. Dans les cas de formation de ponts, le mélange ne se fait pas et le coefficient de variation peut dépasser 25 %.

La figure 33 examine le C_v et le temps de mélange pour une préparation comprenant 99,5 % d'ensilage de maïs à haut degré d'humidité et 0,5 % de sel. On a mélangé les ingrédients dans un appareil horizontal. L'étirement du temps de mélange de 1 à 10 min a fait chuté le C_v de 13,8 à 5,9 %. Le temps de

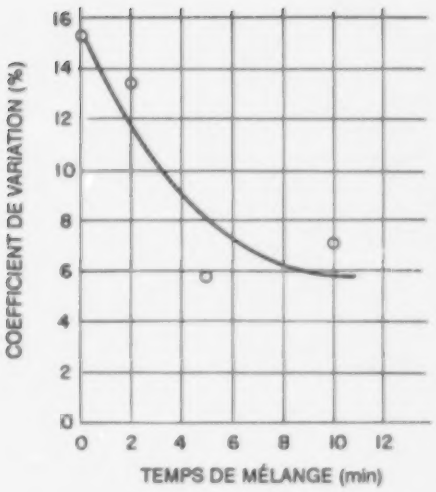


Fig. 33 Coefficient de variation et temps de mélange pour un mélangeur horizontal par lot (Lenton, 1975).

mélange optimal dans ce cas est de 5 min, pour un coefficient de 8 %.

3.7 *Admission et décharge des produits* Pour obtenir un mélange précis et constant, il faut répéter, pour chaque lot, la même séquence d'incorporation, en commençant par les principaux ingrédients, suivis des ingrédients secondaires. Cette méthode réduit les risques de séparation et permet souvent d'écourter le temps de mélange.

La décharge, à partir d'un mélangeur vertical, d'une ration à 100 % de grains n'affecte pas l'homogénéité du mélange. Par contre, les premiers échantillons (15 s) d'une ration à 60 % de grains et à 40 % de foin peuvent contenir 2,5 à 6 fois plus de minéraux que la moyenne du lot.

3.8 *Agitateurs* Les agitateurs influent considérablement sur le rendement des mélangeurs. La figure 34 montre deux mouvements : spires uniformes et spires inférieures étirées. Selon Lenton (1975), les agitateurs à spires inférieures étirées donnent de meilleurs résultats pendant les 15 premières secondes de décharge pour les préparations à forte teneur en minéraux.

3.9 *Catégories de mélangeurs* Dans le présent manuel, les mélangeurs par lot et les mélangeurs en continu forment deux groupes distincts. Le premier groupe comprend trois sous-groupes :

- les mélangeurs horizontaux
- les mélangeurs verticaux
- les mélangeurs rotatifs

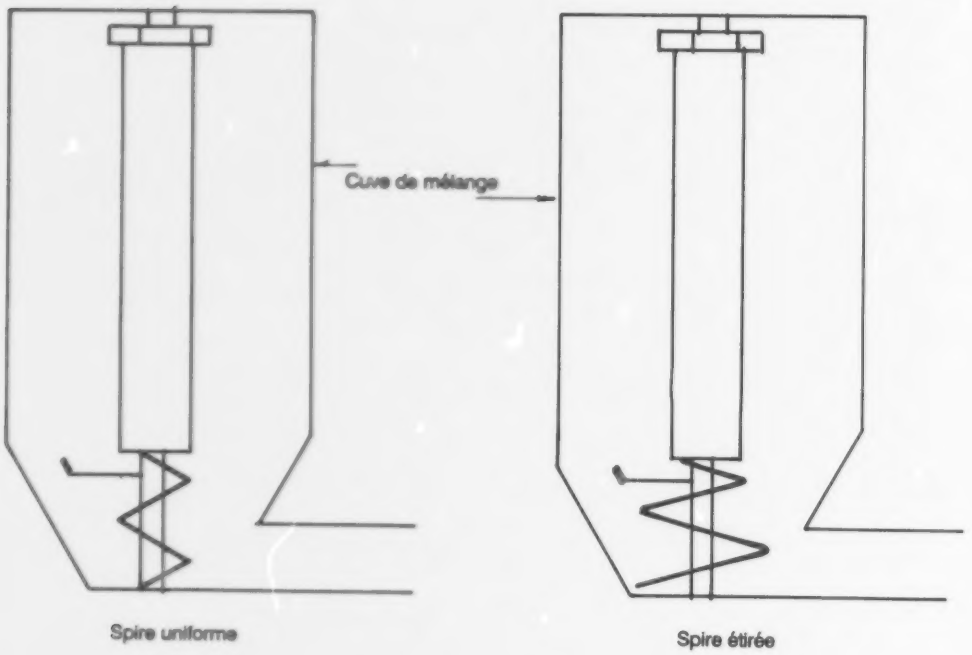


Fig. 34 Agitateurs à spires uniformes et étirées dans des mélangeurs verticaux par lot.

3.10 Mélangeurs horizontaux par lot

Les mélangeurs horizontaux par lot comprennent une cuve en forme d'auge, à fond semi-cylindrique, à parois verticales, ouverte sur le dessus. L'arbre d'entraînement court au centre de la cuve et retient un agitateur ou plus. De nombreux modèles d'agitateurs sont disponibles, les plus courants étant ceux à ruban et ceux à ailettes.

Presque tous les mélangeurs sont en acier. On trouve aussi des mélangeurs sanitaires, en acier inoxydable, pour traiter les produits corrosifs ou très abrasifs et pour mélanger les aliments. Le fait que des mélangeurs horizontaux par lot soient capables de produire des préparations de faible C_v les rend très utiles pour un grand nombre de produits.

Le mélangeur horizontal par lot s'impose pour les préparations liquides et les rations à haut degré d'humidité. Dans un mélangeur vertical, la décharge de ces produits peut susciter des difficultés. Le mélangeur horizontal donne aussi de meilleurs résultats pour les rations comprenant des plantes fourragères.

Les mélangeurs horizontaux par lot sont souvent utilisés en parallèle avec une balance à trémie qui permet de préparer d'avance le prochain lot à mélanger. La capacité des mélangeurs horizontaux sur le marché joue entre 0,05 et 57 m^3.

3.11 *Agitateurs à ruban* La figure 35 montre un mélangeur horizontal par lot, équipé d'un agitateur à deux rubans. Pendant l'opération, les rubans déplacent les ingrédients en sens opposé, ce qui améliore le mélange. Le ruban extérieur pousse les produits vers la décharge tandis que le ruban intérieur les ramène vers l'admission. L'espace libre entre les rubans et le fond de la cuve facilite la vidange de l'appareil.

Dans certains mélangeurs, les rubans extérieurs portent des balais en cuir ou en matériel synthétique. Ces balais contribuent à

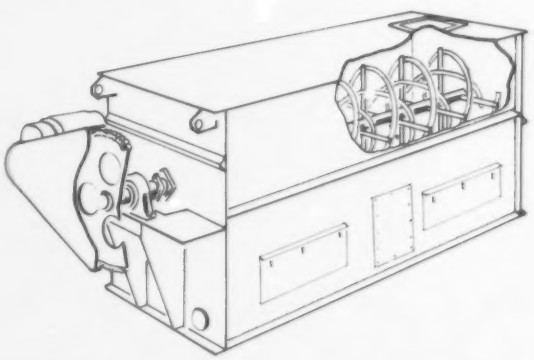


Fig. 35 Mélangeur horizontal par lot avec agitateur à double ruban. Source : Koppers Co., Inc.

la vidange et préviennent l'intercontamination des lots. Les utilisateurs déplorent, cependant, l'usure rapide des balais qu'il faut remplacer fréquemment. Un fabricant propose un agitateur dont l'arbre est équipé de buses à jet d'air pour nettoyer le fond, l'arbre de transmission et les parois. Selon la capacité de l'appareil, la pression d'air requise varie de 350 à 700 kPa.

La plupart des exploitations n'ont pas besoin d'un équipement de nettoyage spécialisé. Pour prévenir les risques d'intercontamination des lots, il suffit de bien planifier la préparation des moulées. À des fins agricoles, le nettoyage manuel des cuves est tout à fait approprié.

3.12 *Agitateurs à ailettes* Les rubans sont ici remplacés par des ailettes ou des cuillers disposées habituellement en spirale le long de l'arbre du mélangeur. Les ailettes ramassent, soulèvent et bousculent les ingrédients en les entrecroisant dans la cuve (fig. 8). L'action des ailettes convient parfaitement pour les produits fibreux et filandreux. Pour mélanger des substances liquides aux moulées solides, les ailettes donnent de meilleurs résultats que les rubans. Le mélangeur à ailettes est décrit à la figure 36.

3.13 *Installation* L'installation d'un mélangeur comprend aussi l'intégration des périphériques d'admission, de décharge et de transport dans les limites d'une structure existante. Les mélangeurs horizontaux sont plus faciles à loger étant donné qu'ils occupent peu d'espace vertical.

On peut installer le mélangeur de différentes façons :

- monté au sol pour une décharge vers l'étage inférieur
- sur des pieds pour une décharge dans un silo volant ou un transporteur
- suspendu au plafond

Le mélangeur peut compter plus d'une goulotte de décharge pour accélérer et faciliter l'évacuation complète des produits finis et le nettoyage de l'appareil. L'alimentation du mélangeur horizontal se fait habituellement par une trémie dans laquelle on vide les poches de moulées ou par un élévateur à godets, via des trémies et silos surélevés ou des vis à grains montées au sol.

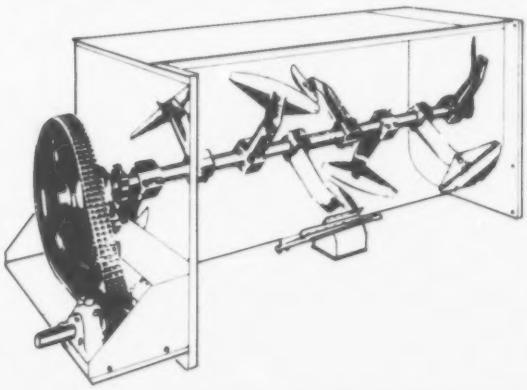


Fig. 36 Mélangeur horizontal par lot avec agitateur à ailettes. Source : Rapids Machinery Co.

3.14 *Puissance nécessaire* Les trois facteurs suivants influent sur la consommation d'énergie du mélangeur horizontal par lot :

- la densité apparente
- le degré d'humidité
- l'agglutination

En règle générale, les mélangeurs horizontaux par lot consomment deux fois plus d'énergie que les mélangeurs verticaux de même capacité. Cette consommation supérieure s'explique par le déplacement constant d'une plus grande proportion d'ingrédients.

Les mélanges d'ingrédients secs qui s'écoulent librement ont besoin d'une force motrice de 7 à 10 kW/t pour les appareils à ruban et d'environ 12 kW/t pour les appareils à ailettes. Les mélanges humides sont plus collants et ont besoin d'une puissance nettement supérieure, compte tenu de l'adhérence des particules.

Les mélangeurs horizontaux par lot fonctionnent à une vitesse de 20 à 50 r/min, selon le diamètre de l'agitateur. Les fabricants suggèrent de 84 à 91 m/min comme vitesse périphérique. Pour obtenir un rendement optimal, on règle la vitesse de l'agitateur après avoir installé le mélangeur.

3.15 Mélangeurs verticaux par lot

Les mélangeurs verticaux par lot présentent une trémie cylindrique et une vis courant verticalement au centre de l'appareil. La vis entraîne les ingrédients du bas vers le haut et les rejette dans la trémie où ils retombent par gravité. Les ingrédients effectuent ce parcours plusieurs fois jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène. En règle générale, on consacre environ 5 min par lot. La capacité des mélangeurs courants varie de 1,4 à 7,8 m^3.

On trouvera le schéma et le fonctionnement d'un mélangeur vertical par lot à la figure 37. Pour éviter la séparation des ingrédients projetés contre les parois du mélangeur, on installe un déflecteur à la sortie du filetage. Le déflecteur laisse passer des particules et en dirige d'autres plus près du cylindre de vis. Une telle installation favorise l'homogénéité et diminue le temps de mélange.

3.16 *Admission et décharge des produits* Les mélangeurs verticaux par lot s'adaptent à nombre de méthodes d'alimentation et de plans

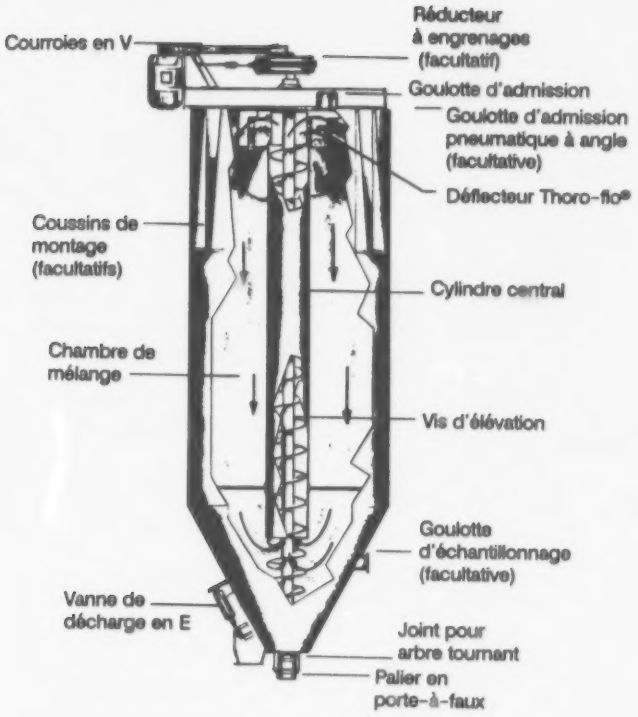


Fig. 37 Schéma et fonctionnement d'un mélangeur vertical par lot. Source : Koppers Co., Inc.

d'aménagement. L'alimentation peut se faire par le haut, par gravité ou au moyen d'un dispositif pneumatique. Dans ce dernier cas, l'admission doit se faire selon un plan tangent pour que la cuve du mélangeur agisse comme récepteur centrifuge. Il faut aussi prévoir une ventilation appropriée. On peut installer le mélangeur vertical entre deux étages pour faciliter l'alimentation par le haut et la décharge par le bas.

On peut aussi alimenter par le bas beaucoup de mélangeurs verticaux par lot. Pour ce faire, on installe une trémie d'alimentation au sol, les tuyères d'ascension courant sous le plancher. Il faut donc ménager un espace vide approprié sous le plancher. La figure 38 illustre cette installation.

Plusieurs techniques de décharge sont possibles. La plupart des utilisateurs optent pour une décharge par gravité dans un transporteur mécanique. D'autres préfèrent l'ensachage direct à partir d'une goulotte de décharge. Les exploitations qui ont besoin d'une souplesse de production disposent de nombreux orifices de décharge.

3.17 *Puissance nécessaire* Les mélangeurs verticaux par lot consomment beaucoup moins

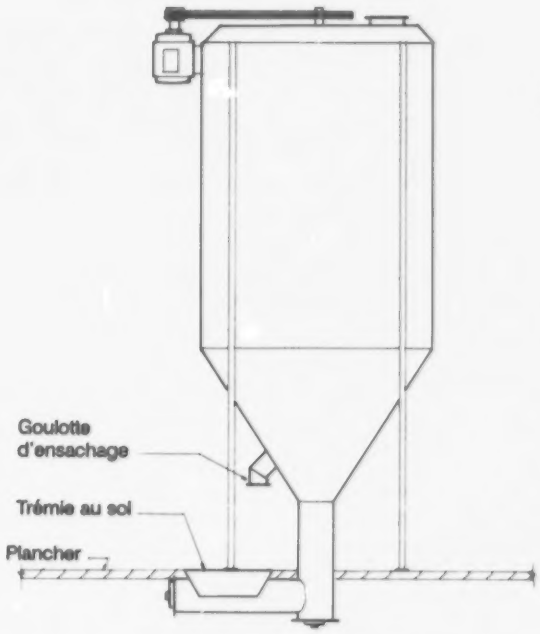


Fig. 38 Mélangeur vertical par lot à alimentation au sol.

d'énergie que les mélangeurs horizontaux par lot. L'agitateur ne déplace toujours qu'une partie des ingrédients. Pour les produits de moulée, la puissance nécessaire est habituellement de 4,5 kW/t.

3.18 Analyse comparative des mélangeurs horizontaux et verticaux par lot

Pour faire le bon choix, il faut tenir compte des constatations suivantes :

- Les mélangeurs horizontaux coûtent plus cher à l'achat que les mélangeurs verticaux.
- L'installation des mélangeurs horizontaux exige davantage d'équipement étant donné que l'alimentation et la décharge se font à des niveaux différents.
- Les mélangeurs verticaux occupent moins d'espace de plancher, mais davantage d'espace vertical.
- Selon l'installation, le débit des mélangeurs horizontaux peut être trois fois supérieur au débit des mélangeurs verticaux.
- Les difficultés d'écoulement empêchent les mélangeurs verticaux de traiter les substances liquides. Par contre, les mélangeurs horizontaux ne peuvent traiter que les liquides non visqueux.

- Les risques d'intercontamination des lots sont plus élevés avec les mélangeurs verticaux étant donné que les appareils ne sont pas autonettoyants. On peut mieux contrôler la vidange des mélangeurs horizontaux faciles à examiner.
- La facilité de réparation ou de remplacement des agitateurs varie d'un type de mélangeur à l'autre. Avant d'acheter un appareil, il faut approfondir ce point.

3.19 Mélangeurs rotatifs par lot

Le mélangeur rotatif par lot est un contenant dans lequel se mélangent les ingrédients par rotation. Les contenants courants sont des tambours tournants, comprenant des ailettes intérieures, ou des fûts de carburant recyclés, installés pour tourner selon un axe diagonal.

On utilise surtout les mélangeurs rotatifs pour les engrais. Le temps de mélange et la puissance nécessaire sont comparables à ceux des mélangeurs horizontaux par lot.

Il faut arrêter le mélangeur pour introduire et décharger les produits par une trappe de visite. Cette installation facilite la vidange de l'appareil. Par contre, on peut charger et décharger les mélangeurs rotatifs au moyen d'un transporteur à vis, mais le nettoyage se complique.

L'utilisation d'un mélangeur rotatif fait de l'ensachage une opération compliquée. Il vaut mieux ne pas incorporer de substances liquides aux mélanges.

3.20 Mélangeurs en continu

Les mélangeurs en continu comprennent :

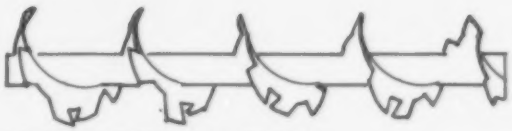
- des appareils à agitateur
- des appareils proportionneurs

Pour ces exploitations ayant à satisfaire de gros besoins de moulée ou d'engrais sec, les mélangeurs en continu sont recommandés. On peut y incorporer plusieurs ingrédients sans interrompre l'opération de mélange. Pour régler le volume des ingrédients à l'admission, on utilise différents appareils (vis de dosage, robinets rotatifs, ouvertures à débit contrôlé).

3.21 *Mélangeurs à agitateur* En règle générale, ce sont des mélangeurs horizontaux à cuve en U, équipés d'une vis à spire spéciale. La figure 39 montre différentes spires. D'autres modèles, plus perfectionnés, sont équipés d'un agitateur à double rangée d'ailettes. Il faut jumeler une balance automatique à ces mélangeurs.

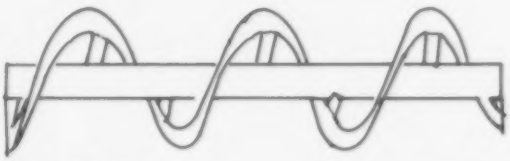
Les qualités suivantes devraient influer sur le choix du mélangeur :

SPIRE TRANCHANTE
Agitation modérée des produits en mouvement



SPIRE TRANCHANTE RECOURBÉE
Aération et mélange des produits en mouvement

SPIRE TRANCHANTE ET AILETTES
Aération et mélange optimal des produits en mouvement



VIS À RUBAN
Produits agglutinants

Fig. 39 Différentes vis de mélange.

- des trappes étanches aux poussières et d'ouverture facile
- des portes s'ouvrant vers le bas pour faciliter le nettoyage
- un dispositif d'admission des substances liquides

La figure 40 montre un mélangeur en continu qui possède toutes ces qualités.

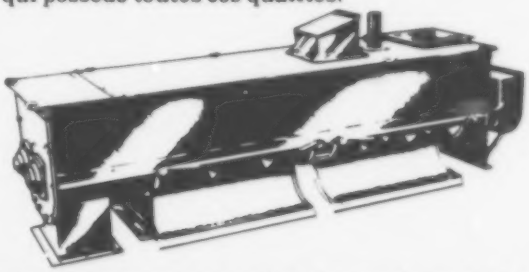


Fig. 40 Mélangeur en continu. Source : Hayes et Stolz Industrial Manufacturing Co., Inc.

Les agitateurs mesurent habituellement 1,8 à 6 m de long. Le débit des appareils va de 650 à 900 kg/kWh, selon les caractéristiques des produits (secs, agglutinants, etc.).

3.22 *Mélangeurs-proportionneurs* Les mélangeurs-proportionneurs se prêtent aux opérations de mélange, sans contrainte exagérée d'homogénéité. Les utilisations recommandées comprennent :

- le mélange des grains de bonne et de mauvaise qualité pour obtenir le meilleur prix de vente possible
- le mélange des grains à haut et à faible degré d'humidité pour économiser les frais de séchage et pour diminuer les pertes causées par la vente de grains trop secs
- le mélange de grains très propres et de grains renfermant trop de matières étrangères

On voit par ces exemples que les mélangeurs-proportionneurs conviennent pour les mélanges dont les échantillons représentent la moyenne du produit total.

On obtient comme suit un mélange de proportion volumétrique :

- en réunissant des quantités précises de produits dans un silo ou un véhicule de transport
- en écoulant continuellement différents produits dans un même transporteur

Deux méthodes permettent d'obtenir le mélange voulu de produits. On peut contrôler le débit de chaque composante du mélange, au moyen de vis d'alimentation à vitesse variable ou de vannes réglables. On peut aussi déterminer le poids des proportions voulues de produits pour ensuite les acheminer au moyen de transporteurs à courroie et à vitesse variable, équipés de balances à bascule réglées en fonction des proportions établies. La figure 41 montre une opération de mélange à proportion volumétrique.

À des fins pratiques, le déplacement des produits sur au moins 6 m au moyen d'un transporteur à vis standard suffit pour mélanger les composantes. Cependant, lorsque le mélange comprend des substances toxiques (urée, par exemple), il faut utiliser un mélangeur précis pour assurer l'uniformité de leur dispersion.

3.23 Choix du mélangeur

On choisit le mélangeur en fonction de la production prévue. Pour les buvées, les gras et huiles, et les fourrages humides, c'est un mélangeur horizontal par lot qui convient. Pour les rations de grains secs, le mélangeur

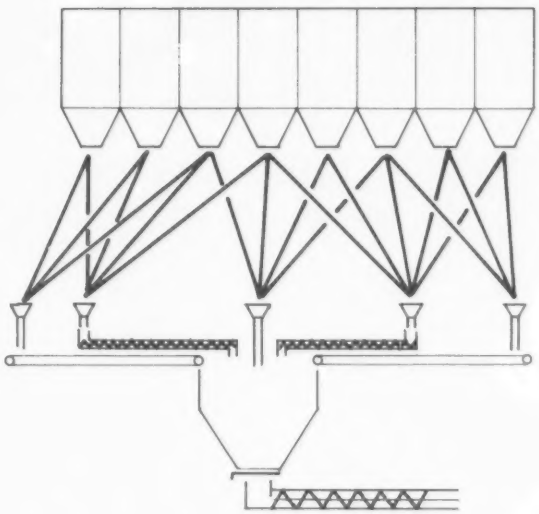


Fig. 41 Diagramme d'une opération de mélange.

vertical par lot est moins cher et consomme moins d'énergie. Il faut aussi tenir compte des contraintes physiques de l'établissement (hauteur libre, espace de plancher, transport des produits).

Pour les préparations qui comprennent des hormones, des antibiotiques et d'autres médicaments, il faut s'assurer que l'appareil mélange ces substances conformément aux normes imposées par les organismes de réglementation. Il faut aussi confirmer la vidange complète du mélangeur pour prévenir la contamination des lots suivants. Les mélangeurs de fortune, comme les bétonnières et les vis, satisfont rarement ces exigences et n'assurent pas la dispersion uniforme des ingrédients.

Une décharge rapide assure le rendement optimal du mélangeur. Des silos volants temporaires, installés à l'avant du transporteur, sont une solution d'entreposage beaucoup plus rentable que l'immobilisation du mélangeur, surtout pour les exploitations à forte production.

La capacité du mélangeur doit correspondre aux opérations de travail. Les facteurs à prendre en considération sont :

- le volume de produits à mélanger périodiquement
- le nombre de préparations différentes
- la croissance éventuelle de l'entreprise
- le temps à consacrer aux opérations de mélange et la fréquence desdites opérations

Le temps requis pour exécuter les opérations normales d'alimentation, de mélange et de décharge dépend de la capacité du mélangeur :

Capacité (kg)	Temps requis par lot (min)
250	9–10
500	14–20
1000	28–35

Les données de ce tableau comprennent l'alimentation et la décharge par transporteur.

La capacité indiquée par le fabricant ne correspond pas toujours à la réalité. C'est la densité des ingrédients à mélanger qui détermine le cubage métrique réel de l'appareil. Pour éviter les débordements en cours de mélange, il vaut mieux prévoir une capacité de 5 à 10 % supérieure au volume des ingrédients.

La densité des rations pour le cheptel varie de 200 à 600 kg/m3. Les rations pour le bétail sont habituellement les moins denses, surtout lorsqu'elles contiennent de la paille ou du foin. Les rations pour les porcs et la volaille ont souvent une densité d'environ 450 kg/m^3.

3.24 Exemple : Préparation de rations pour vaches et progéniture, porcs et volaille

Dans le cas à l'étude, il faut choisir un mélangeur capable de préparer des rations pour 27 vaches, 10 veaux et génisses, 140 porcs et 2 500 poules.

Dans un premier temps, on précise le volume maximum de rations requises chaque semaine.

27 vaches × 7 kg/jour	=	1 323 kg/semaine
10 veaux et génisses × 3,5 kg/jour	=	245 kg/semaine
140 porcs × 3 kg/jour	=	2 940 kg/semaine
2 500 poules × 0,1 kg/jour	=	1 750 kg/semaine
Volume total de moulée mélangée	=	5 068 kg/semaine

Pour satisfaire ces besoins, on peut utiliser un appareil de 500 kg et l'utiliser chaque jour (sauf le dimanche) pour mélanger les rations des porcs et quatre fois par semaine pour mélanger les rations des vaches et des poules. À raison de 20 min par lot, excluant la préparation et le nettoyage, le mélangeur fonctionne ainsi pendant 4 h et 40 min par semaine.

Un appareil de 1 000 kg convient mieux à l'utilisateur désireux de mélanger toutes les rations le même matin. À raison de 35 min par lot, le mélangeur fonctionne pendant 4 h et 5 min, soit une diminution relative de 6 % du temps de travail. Les facteurs déterminants dans le cas à l'étude sont l'espace d'entreposage disponible et le degré de fraîcheur désiré. La capacité du mélangeur dépend davantage des circonstances particulières à chaque exploitant que du coût en capital.

3.25 Traitement des grains

On peut traiter les grains avec des fongicides, des insecticides, des oligo-éléments et des inoculants. L'application des produits chimiques se fait à l'état de solutions, de poudres ou de boues liquides. Les taux d'application sont très faibles (aussi peu que 400 mL/m^3), si bien que le mélange doit être parfait pour donner des résultats satisfaisants. Les fabricants offrent des appareils industriels (débit de 90 à 460 m^3/h) et des petits mélangeurs par lot (0,5 à 2 kg), qui conjuguent les fonctions de mélange et de traitement.

Les produits chimiques sont habituellement pulvérisés sur les grains au fil de leur descente dans une chambre de pulvérisation. Les grains passent ensuite dans une chambre d'enrobage pour y être brassés par une vis de manière à uniformiser l'enrobage. La figure 42 montre un appareil de traitement des grains et la figure 43, les différentes spires d'enrobage.

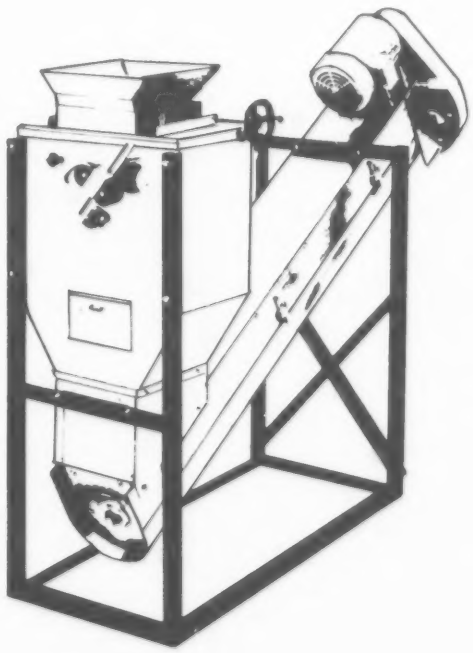
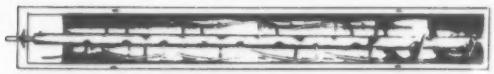
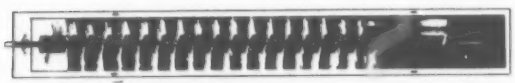


Fig. 42 Appareil de traitement des grains accouplé à une chambre d'enrobage. Source : Gustafson, Inc.

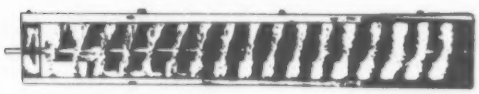


SPIRE ET TIGES DE MÉLANGE
Petits grains et maïs-grain

SPIRE COMPLÈTE
Traitement optimal

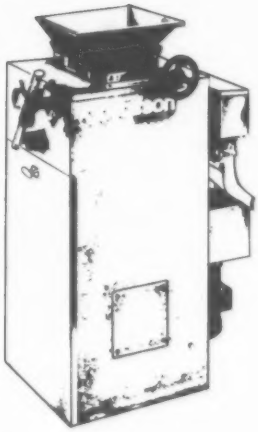


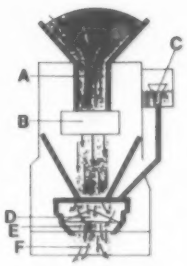
SPIRE ET BROSSE EN NYLON
Traitement délicat des grains



BROSSE COMPLÈTE
Traitement très délicat des grains

Fig. 43 Différentes vis d'enrobage. Source : Gustafson, Inc.





A Contrôle d'admission
B Proportionneur de grains
C Doseur de produits chimiques
D Auréole de dispersion
E Disque tournant
F Décharge par gravité

Fig. 44 Appareil de traitement des grains par vaporisation. Source : Gustafson, Inc.

L'application des produits chimiques au moyen d'un disque tournant à grande vitesse est une autre façon de procéder. Le disque vaporise les produits en une buée dans laquelle circulent les grains. La figure 44 montre un appareil de vaporisation. Cette méthode est particulièrement efficace pour traiter les grains de forme irrégulière. L'appareil comprend deux régulateurs indépendants d'admission : un pour les grains, l'autre pour les produits chimiques. Dans le vaporisateur illustré, les grains s'écoulent sur une auréole de dispersion, puis dans une chambre de vaporisation où ils reçoivent une dose relativement égale de produits chimiques. Les grains continuent leur course dans une chambre d'enrobage pour assurer un mélange complet.

La figure 45 montre un pulvérisateur de produits chimiques. Dans ce cas, un bac vibrant déverse les poudres chimiques sur les grains avant qu'ils n'atteignent la chambre de mélange. Le mélange s'effectue ainsi plus tôt qu'avec d'autres appareils.

Les produits chimiques utilisés sont souvent très toxiques. Il faut donc prendre toutes les mesures de sécurité appropriées pour protéger les travailleurs et les animaux susceptibles d'entrer en contact avec les produits. Dans la mesure du possible, il faut utiliser immédiatement les grains traités, lesquels commandent des installations spéciales d'entreposage. Les grains traités ne peuvent servir dans les préparations de moulée, ne satisfont pas toujours les normes de germination après un an d'entreposage et posent des problèmes d'élimination. Les grains conservés sont fragiles à la contamination par les résidus de pesticide des autres grains et des moulées. Il vaut mieux ne traiter que les quantités de grains qui peuvent être utilisées tout de suite.

Le traitement des grains est une excellente technique de lutte contre les maladies véhiculées par les semences. L'exemption de toute maladie se traduit par une augmentation du taux de levée et par la vigueur des plants au départ. Le tableau 11 précise les augmentations de rendement obtenues avec des grains traités.

4 SYSTÈMES COMPLETS

Par systèmes complets, on entend les combinaisons d'appareils qui exécutent toutes les fonctions de trituration, de mélange et de transport des produits. Plusieurs fabricants offrent ce genre de systèmes, fixes ou mobiles.

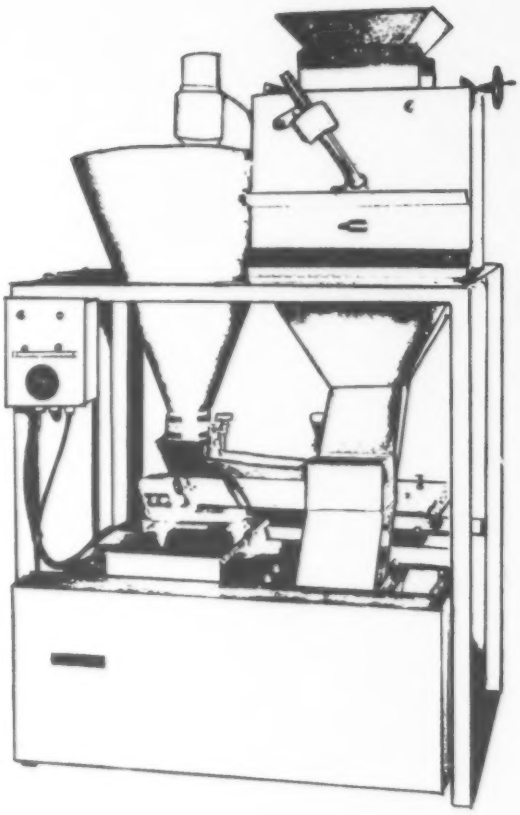


Fig. 45 Appareil de traitement des grains par pulvérisation. Source : Gustafson, Inc.

Tableau 11 Augmentation de rendement par traitement des grains

Endroit	Culture	Augmentation de rendement (m^3/ha)
Î.-P.-É.	Orge de printemps	0,35
Saskatchewan	Orge de printemps	0,21–0,24
Î.-P.-É.	Blé d'hiver	0,26
Saskatchewan	Blé de printemps	0,08–0,16

Source : Edgington, Kelly et Reinbergs, 1973.

4.1 Systèmes fixes

Les systèmes fixes facilitent la préparation des rations pour les entreprises qui conservent leurs matières premières en un seul endroit. Les systèmes fixes comprennent des broyeurs-mélangeurs-proportionneurs et des ateliers de fabrication de granulés.

4.2 *Broyeurs-mélangeurs-proportionneurs* Ces systèmes comprennent un broyeur à marteaux et quatre vis d'alimentation à vitesse variable ou plus. Les vis d'alimentation amènent simultanément et continuellement chaque ingrédient jusqu'au broyeur. La figure 46 montre un tel système. Des silos volants fournissent les matières premières aux vis de dosage qui alimentent le broyeur à marteaux. Ces matières premières y sont alors broyées et mélangées. Une vis de décharge ou un dispositif de décharge par gravité complète le cycle de production.

La figure 47 montre un autre système complet comprenant, cette fois, une rouleuse à grains qui décharge les produits traités dans un mélangeur à vis où sont ajoutés les ingrédients complémentaires dans les volumes commandés par des distributeurs vibrants.

Pour assurer l'efficacité d'un broyeur-mélangeur-proportionneur, il faut bien régler les dispositifs de dosage des ingrédients, puis vérifier souvent le fonctionnement du système. La proportion est volumétrique. Le réglage se fait en déterminant le poids de sortie des différentes voies d'alimentation du broyeur. Pour établir une table d'étalonnage, il faut reprendre la procédure en utilisant toute une gamme de positions. On ajuste ensuite le système en fonction des débits voulus et des données correspondantes qui figurent dans la table d'étalonnage.

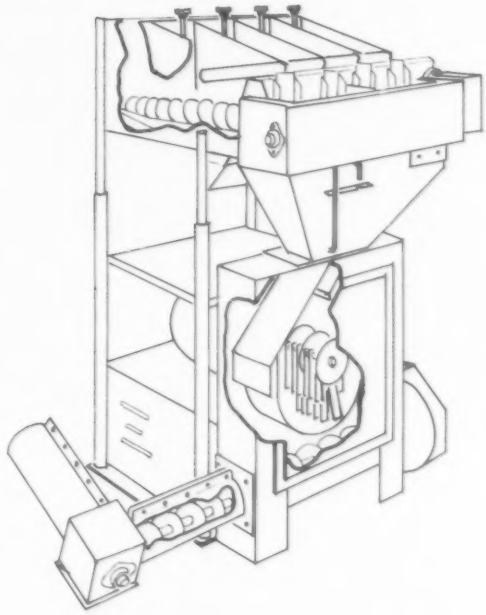


Fig. 46 Broyeur-mélangeur-proportionneur. Source : Clay Equipment Corp.

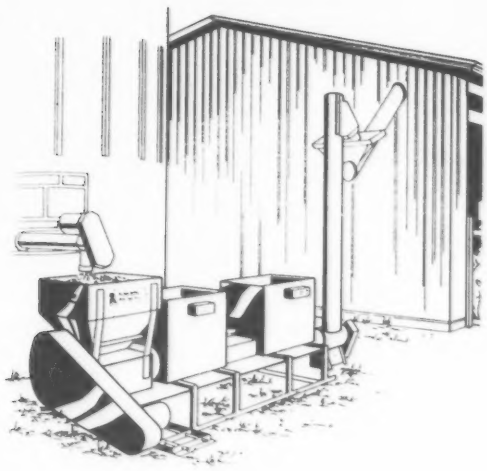


Fig. 47 Broyeur-mélangeur-proportionneur accouplé à une rouleuse à grains. Source : Roskamp Manufacturing, Inc.

C'est le poids qui détermine la préparation des rations, mais c'est le volume qui sert de mesure pour les composantes des moulées. Il faut donc régler à nouveau les dispositifs de dosage lorsque les ingrédients montrent de nouvelles densités apparentes. Pour ce faire, il faut se fier aux renseignements fournis par le fabricant.

L'analyse de rations préparées au Manitoba et en Ontario au moyen de broyeurs-mélangeurs-proportionneurs a démontré que 70 % desdites rations n'étaient pas équilibrées en calcium, en phosphore et en protéines. Le réglage du système en était responsable. Dûment réglés, les systèmes de production ont donné des résultats au coefficient de variation acceptable, soit 11 à 12 %. La section 3.2 approfondit la question du coefficient de variation.

Le débit des broyeurs-mélangeurs-proportionneurs varie selon le type de grain, le degré d'humidité et la technique de broyage. Comme valeur moyenne, on peut avancer un rendement spécifique d'environ 600 kg/kWh de maïs-grain sec pour un broyeur à marteaux équipé d'une passe de 6,35 mm. Les rouleuses à grains, pour leur part, ont un rendement de 600 à 2 000 kg/kWh de maïs-grain sec, selon la grosseur des rouleaux et les caractéristiques des cannelures. Cependant, les rouleuses ne peuvent bien traiter qu'une sorte de grain à la fois et ne peuvent traiter les fourrages grossiers.

4.3 *Ateliers de fabrication de granulés* Ces ateliers permettent aux propriétaires des petites meuneries de produire des granulés à partir des préparations individuelles et des matières premières locales. Les ateliers comprennent toutes les composantes requises pour produire des granulés, les refroidir et les

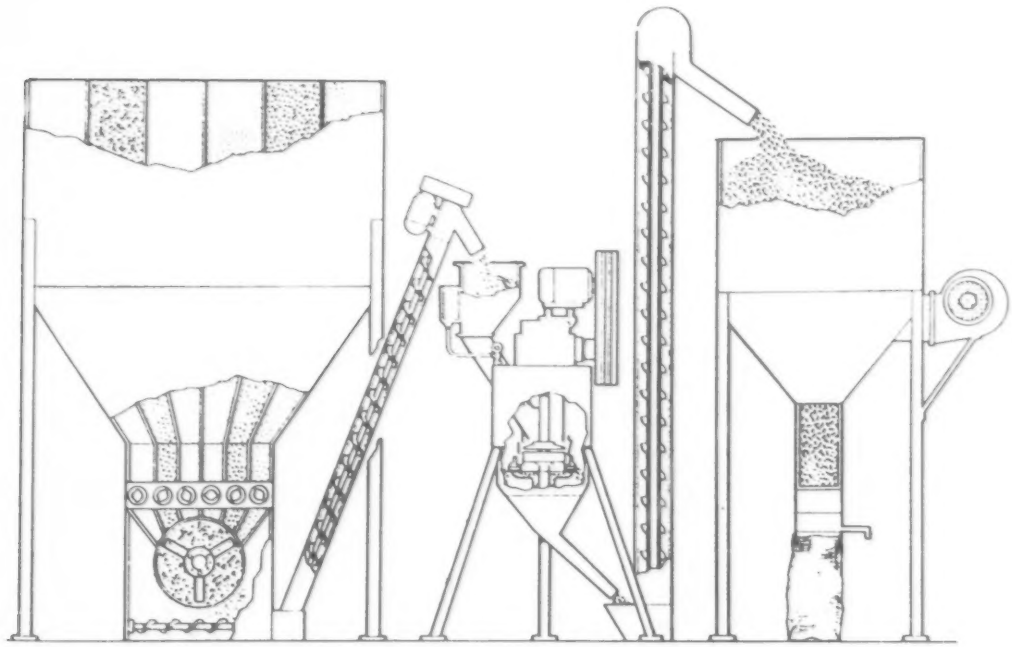


Fig. 48 Atelier simple de fabrication de granulés. Source : Farm Choring Ltd.

ensacher ou les décharger par transporteur mécanique. Les ateliers peuvent comprendre des appareils de broyage, mais dans la plupart des cas, on utilise des produits préalablement broyés.

La figure 48 montre un atelier relativement simple. Un broyeur-mélangeur prépare les rations et des transporteurs mécaniques assurent l'alimentation et la décharge. Les granulés sont évacués dans une cellule aérée, où ils refroidissent, puis sont directement ensachés. Le système permet d'ajouter de l'eau au produit, mais ne prévoit aucunement l'injection de vapeur ni la récupération des poussières. La force motrice requise varie entre 7,5 et 18,5 kW pour un débit d'opération d'environ 40 kg/h avec une passe de 3,2 mm.

La figure 49 montre un atelier plus complexe qui comprend de gros appareils de fabrication de granulés, équipés d'unités d'injection de vapeur et d'un système d'admission franche des produits. Des transporteurs pneumatiques acheminent les granulés dans un cyclone collecteur, puis dans un refroidisseur. Les granulés sont ensuite utilisés tels quels ou émiettés au-dessus d'une passe pour séparer les particules fines et grossières. Les particules ou les granulés tombent de la passe dans un silo volant, puis sont ensachés. Le système récupère les poussières et les retournent dans la chambre de mélange, située à l'avant de l'appareil de fabrication des granulés.

On peut obtenir un rendement de 900 kg/h avec un système à injection d'eau et une force motrice de 22 kW. L'injection de vapeur augmente sensiblement le rendement (entre 1 300 et 2 300 kg/h).

Pour ce genre d'atelier de fabrication de granulés, les ingrédients doivent être préparés avant leur admission dans la cuve matière. Avec leurs broyeurs plus coûteux et plus polyvalents, les ateliers complexes produisent, par rapport aux ateliers simples, de plus gros volumes de granulés de meilleure qualité.

4.4 Systèmes mobiles

Les systèmes mobiles satisfont les besoins des exploitations qui stockent leurs matières premières en différents endroits ou qui distribuent la moulée sur une grande surface ou distance. Les systèmes mobiles comprennent des broyeurs-mélangeurs, des rouleuses-mélangeuses et des mélangeurs-alimenteurs.

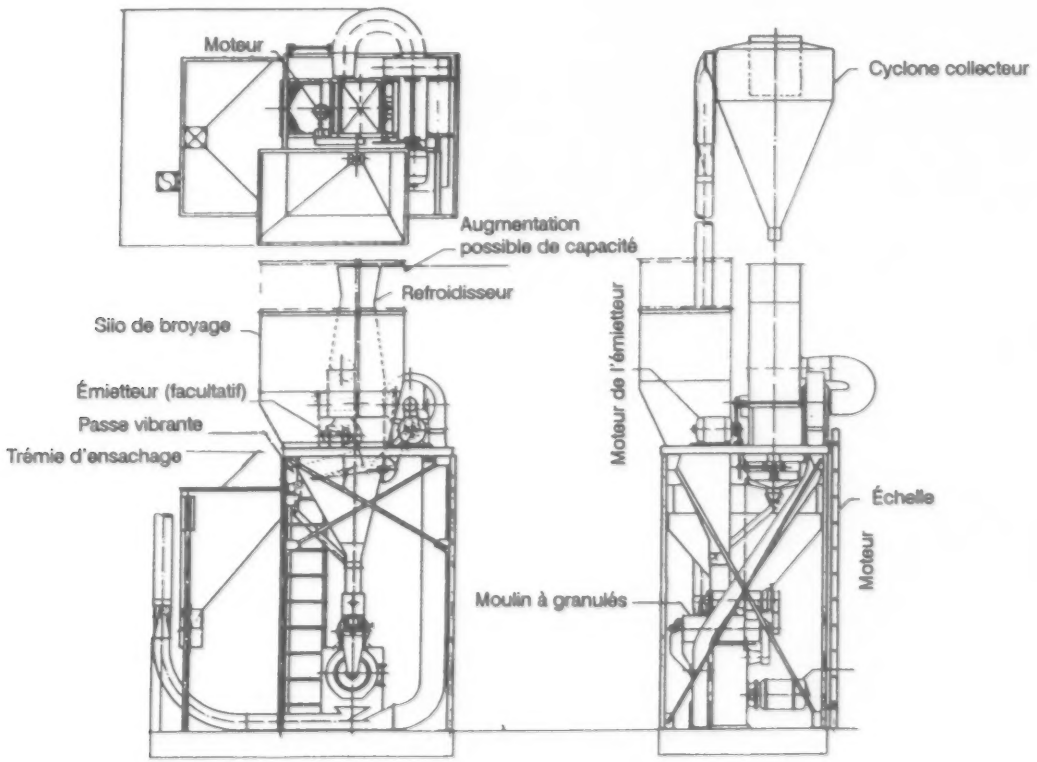


Fig. 49 Atelier complexe de fabrication de granulés. Source : CPM Co.

4.5 *Broyeurs-mélangeurs* Les broyeurs-mélangeurs mobiles sont des appareils polyvalents qui transportent, broient, mélangent et distribuent les moulées. Ces appareils peuvent traiter les grains, l'ensilage et le foin. La polyvalence des broyeurs-mélangeurs mobiles en fait le système de traitement initial par excellence dans les petites entreprises d'élevage.

Le broyeur-mélangeur courant intègre un broyeur à marteaux et un mélangeur vertical en une même remorque (fig. 50). Le système peut aussi comprendre des balances dont le degré de justesse permet uniquement de doser les principaux ingrédients comme les grains. Les ingrédients supplémentaires sont ajoutés à la main, à partir d'une trémie distincte.

L'efficacité des broyeurs-mélangeurs souffre de leur débit limité, des exigences de main-d'oeuvre et des coûts élevés d'utilisation. Les essais réalisés au Manitoba ont donné lieu aux recommandations suivantes :

- Ajouter les ingrédients supplémentaires lorsque la cuve du mélangeur est remplie de grains à 5 % au moins de sa capacité.
- Lorsque tous les ingrédients sont incorporés, faire tourner le mélangeur pendant 5 min. Après 10 min, commence le phénomène de séparation des fibres et des grains.
- Pour les mélanges contenant des substances dangereuses (urée, par exemple), éliminer les moulées déchargées pendant les 15 premières secondes.

C'est la prise de force (PDF) qui fait tourner les broyeurs-mélangeurs mobiles. Pour un seul appareil, il faut compter sur une force motrice de 45 à 75 kW. La capacité des cuves de mélange varie de 2 à 3 t. Le rythme de broyage peut atteindre 6 à 9 t/h, mais pour la préparation des moulées (admission des ingrédients, broyage, mélange et distribution), le rythme tombe entre 2 et 3 t/h.

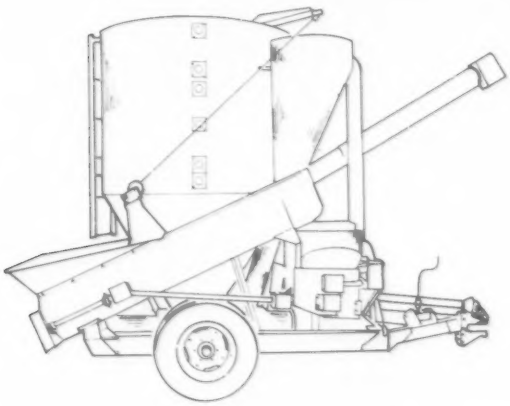


Fig. 50 Mélangeur-broyeur mobile. Source : New Holland Division, Sperry Rand Corp.

4.6 *Rouleuses-mélangeuses* Les rouleuses-mélangeuses mobiles ressemblent aux broyeurs-mélangeurs mobiles. Le broyeur à marteaux est remplacé par une rouleuse à grains.

La capacité du mélangeur détermine le débit de la rouleuse-mélangeuse mobile. La force motrice requise et le débit sont comparables à ceux des appareils précédents.

La capacité du mélangeur détermine le débit de la rouleuse-mélangeuse mobile. La force motrice requise et le débit sont comparables à ceux des appareils précédents.

4.7 *Mélangeurs-alimenteurs* Les mélangeurs-alimenteurs mobiles sont des mélangeurs horizontaux, équipés d'un dispositif de décharge dans une mangeoire ou un nourrisseur automatique. On trouve différents modèles, montés sur camion ou remorque. En règle générale, une vis fait fonction d'agitateur, mais on trouve aussi des agitateurs à moulinet. La plupart des mélangeurs-alimenteurs sont conçus pour traiter les petits grains, le maïs-grain et les moulées broyées. D'autres modèles sont équipés de transporteurs assez gros pour traiter l'ensilage et le fourrage grossier.

Habituellement, l'admission des produits se fait par le haut et la décharge se fait par un toboggan latéral, un élévateur à vis ou un transporteur à chaîne. Les systèmes peuvent comprendre des balances électroniques pour doser les produits à l'admission et à la décharge.

La figure 51 montre un plan transversal d'un mélangeur-alimenteur mobile à trois vis d'agitation et à décharge latérale. Quant à la figure 52, il s'agit d'un mélangeur-alimenteur avec élévateur à vis accouplé à la remorque.

La capacité des mélangeurs-alimenteurs varie de 4,8 à 12 m^3. La puissance nécessaire dépend du type de ration. En règle générale, le traitement de l'ensilage semi-fané et des produits agglutinants requiert plus d'énergie que le traitement des grains secs. Les

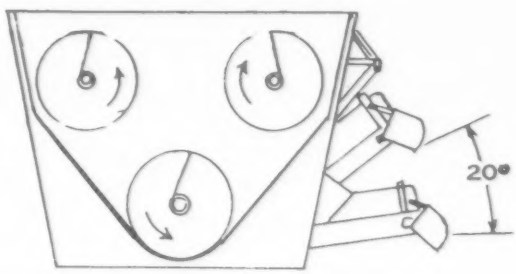


Fig. 51 Coupe transversale d'un mélangeur-alimenteur. Source : Henke Machine, Inc.

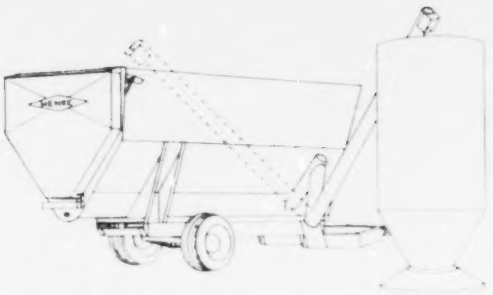


Fig. 52 Mélangeur-alimenteur remorqué. Source : Henke Machine, Inc.

appareils tournent à partir de la prise de force du tracteur ou du camion remorqueur. Certains petits modèles sont dotés d'un moteur autonome capable de produire 7,5 à 15 kW. D'autres gros modèles sont dotés d'un moteur de 30 à 37,5 kW.

Les mélangeurs horizontaux font de meilleurs appareils mobiles que les mélangeurs verticaux. Ils sont plus polyvalents et leur centre de gravité est plus bas.

4.8 Broyeurs à foin

Au Canada, le broyage du foin et de la paille est de plus en plus courant dans les exploitations agricoles pour améliorer le rendement alimentaire de ces matières premières et pour diminuer le volume de pertes. Habituellement, on donne le foin broyé en même temps que la ration de grains, dans un mélange ou comme aliment distinct.

Les deux appareils les plus couramment utilisés pour broyer le foin sont :

- les broyeurs de petites balles
- les broyeurs rotatifs

4.9 *Broyeurs de petites balles* Ces appareils déchiquettent les balles de foin ou de paille au moyen de marteaux ou d'un jeu de couteaux montés sur un arbre rotatif. Dans le fond de la chambre de broyage, une passe détermine la grosseur des particules. Le débit des broyeurs de petites balles varie de 5,5 à 18 t/h, avec une passe de 25 mm. La puissance nécessaire est grande, compte tenu du fort volume de fibres et du stress mécanique imposé par l'admission forcée des balles dans la chambre de broyage. Pour utiliser ces appareils, il faut disposer d'un tracteur dont le PDF est de 20 à 120 kW. La puissance nécessaire dépend du type de foin, du degré d'humidité, des dimensions du broyeur et du rythme d'alimentation.

4.10 *Broyeurs rotatifs* Ces appareils sont des broyeurs à marteaux tractables, actionnées par la prise de force d'un tracteur et intégrées dans le fond d'une cuve rotative. Leur action déchiquette le foin et la paille dispersés ou en balles.

Les broyeurs rotatifs sont conçus pour une alimentation par chargeur à benne frontale. La rotation du tambour assure le rythme de broyage du broyeur à marteaux. Une passe installée sous le broyeur détermine le coefficient de finesse des particules. Celles-ci tombent dans un transporteur à vis ou à tablier, qui les acheminent jusqu'à un transporteur à bande muni de lattes. La figure 53 montre un broyeur rotatif courant.

Les facteurs suivants influent sur le débit et la consommation d'énergie des broyeurs rotatifs :

- le type de foin
- son état (dispersé ou en balles)
- le degré d'humidité et la température
- le diamètre des orifices de la passe
- la puissance du tracteur

Plus la température est basse, plus le débit augmente parallèlement à la friabilité du foin. Par contre, un haut degré d'humidité affecte le débit.

Les broyeurs rotatifs ne sont pas très efficaces. Ils consomment beaucoup d'énergie pour un rendement modeste. La passe est la composante déterminante, influant directement sur le rythme de broyage, la consommation d'énergie et le débit. En divisant par deux le diamètre des orifices, on multiplie par deux la consommation d'énergie et on divise par deux le rythme de broyage et le débit de l'appareil.

En règle générale, l'alimentation des broyeurs rotatifs se fait au moyen d'un chargeur qui jette les balles de foin dans la cuve. Le stress mécanique imposé à la chaîne dynamique, provoque de grandes fluctuations de puissance. L'Institut de la machinerie agricole des Prairies (IMAP) a réalisé des essais démontrant que la puissance de PDF doit être de 50 à 90 % supérieure à la moyenne, pour empêcher le tracteur de caler. La plupart des appareils sont équipés de régulateurs qui permettent l'utilisation des tracteurs de faible puissance.

L'IMAP a testé cinq broyeurs rotatifs vendus au Canada en 1976 et 1977. Le tableau 12 présente les résultats de cette étude.

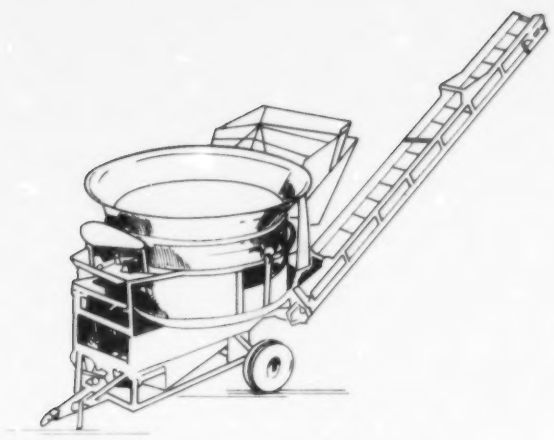


Fig. 53 Broyeur rotatif. Source : Haybuster Manufacturing, Inc.

Tableau 12 Rendement d'un broyeur rotatif équipé d'une passe de 51 mm

Produits	Débit d'opération (t/h)	Puissance de PDF (kW)	Rendement spécifique (t/kWh)
Luzerne en balles	4,2–13,0	9,0–52,0	
Luzerne en meules	3,4–16,0	13,0–54,0	0,16–0,37
Paille d'orge en meules	3,7–10,0	24,0–53,0	
Paille d'orge en balles	2,8–18,6	33,0–100,0	0,08–0,20

Source : Rapports d'évaluation E0475A, E0475B, E0475C, E0475D et E0475F de l'Institut de la machinerie agricole des Prairies.

BIBLIOGRAPHIE

Batch and continuous-paddle-blade mixers for the processing industries, catalogue 180, Rapids Machinery Company, Marion (Iowa), 1980.

California master model pellet plant, formule 5641-R, California Pellet Mill Co., San Francisco (Californie).

Clay meter/mill, bulletin MM-307, Clay Equipment Corp., Cedar Falls (Iowa).

Edgington, L. V., C. B. Kelly et E. Reinbergs : *Availability of cereal seed treatment in Ontario*, ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation de l'Ontario, Agdex 110/23, 1973.

Ensminger, M. E. et C. G. Olentine : *Feeds and Nutrition*, Ensminger Publishing Company, Clovis (Californie), 1978.

Larson, F. D. : *Reduction hammer mill*, Colloque international sur la fabrication des moulées et le traitement des grains, Underwood McLellan Ltd., Winnipeg (Manitoba), 1978*a*.

Larson, F. D. : *Reduction roller mill*, Colloque international sur la fabrication des moulées et le traitement des grains, Underwood McLellan Ltd., Winnipeg (Manitoba), 1978*b*.

Larson, F. D. : *Mixing Fundamentals*, Colloque international sur la fabrication des moulées et le traitement des grains, Underwood McLellan Ltd., Winnipeg (Manitoba), 1978*c*.

Lenton, K. G. : *Evaluation of mixing performance of on-farm feed-mixers*, rapport 75-109, Société canadienne des ingénieurs agronomes, 1975.

Lewis, J. E. : *Roller mills in grain processing*, Association canadienne des industries de l'alimentation animale, Ottawa (Ontario), 1978.

Lister farm feed pelleters, Farm Choring Limited, Edmonton (Alberta).

Naylor, J. L. et R. Smith : *Roller mills vs. hammer mills on corn*, rapport 81-3028, American Society of Agricultural Engineers, 1981.

Naylor, J. L. et R. Smith : *Roller mills (current state of the industry)*, rapport 81-3027, American Society of Agricultural Engineers, 1981.

Nyborg, E. O. : *Sperry New Holland model 379 tub grinder*, rapport E0475A, Institut de la machinerie agricole des Prairies, 1978.

Nyborg, E. O. : *Farmhand model F890-A tub grinder*, rapport E0475B, Institut de la machinerie agricole des Prairies, 1978.

Nyborg, E. O. : *Haybuster model C-9 tub grinder*, rapport E0475C, Institut de la machinerie agricole des Prairies, 1978.

Nyborg, E. O. : *Bearcat Tub-Master feed grinder mode' 4200*, rapport E0475D, Institut de la machinerie agricole des Prairies, 1978.

Nyborg, E. O. : *Haybuster model H-1000 tub grinder*, rapport E0475F, Institut de la machinerie agricole des Prairies, 1978.

Operation and instruction manual for Bliss eliminator hammer mills model E-1912-TF, Bliss Industries, Newkirk (Oklahoma).

Prew, S. R. : *Increasing hammermill efficiency: a need in an era of rising power costs*, réimpression SR-1 de Pointers for profits, Koppers Engineered Products, Muncy (Pennsylvanie), 1981.

Protz, A. : *Transformation et manutention des provendes à la ferme*, publication 1572, Agriculture Canada, Ottawa (Ontario), 1976.

Reece, F. N. et B. D. Lott : *Roller mills found competitive in broiler feed production*, Feedstuffs, 25 novembre 1985.

Roskamp feed processing centers, document RFPC-80-CP , Roskamp Manufacturing Inc., Cedar Falls (Iowa).

Roskamp 12 × 30 roller mill operation manual, Roskamp Manufacturing Inc., Waterloo (Iowa).

Roskamp pork producers, Roskamp Manufacturing Inc., Cedar Falls (Iowa).

Summerfield, A. J. : *Feed preparation on the farm*, Agricultural Engineer, hiver 1984.

Tailor-made crushing, Gebr. Bauermeister and Co., Hambourg (RFA).

Thomas, G. F. : *Basic facts in focus of grinding, mixing conveying with air*, The Feed Bag 4:88-90, 1958.

Weeden, J. K. et J. G. Norrish : *Stationary blender/grinders-A field evaluation*, rapport 81-101, Société canadienne des ingénieurs agronomes, 1981.